

Article, Published Version

Metheja, Andreas; Schwarze, Horst; Zimmermann, Claus
Simulation von Sedimentation und Erosion in
Lahnungsfeldern

Die Küste

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:
Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101408>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Metheja, Andreas; Schwarze, Horst; Zimmermann, Claus (1998): Simulation von Sedimentation und Erosion in Lahnungsfeldern. In: Die Küste 60. Heide, Holstein: Boyens. S. 161-190.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Simulation von Sedimentation und Erosion in Lahnungsfeldern

Von ANDREAS MATHEJA, HORST SCHWARZE u. CLAUS ZIMMERMANN

Zusammenfassung

In dem vom BMBF geförderten KFKI-Projekt MTK 0564 „Optimierung von Küstensicherungsmaßnahmen im Küstenvorfeld der Nordseeküste“ wurden im Teilprojekt „Wellenuntersuchungen in Modell-Lahnungen“ in Ergänzung zu theoretischen Untersuchungen und physikalischen Modellversuchen numerische Simulationen zur Sedimentation und Erosion in Lahnungsfeldern durchgeführt.

Hierzu wurden mit Hilfe des Programmsystems MIKE21® des DANISH HYDRAULIC INSTITUTE zunächst ein Seegangmodell, ein hydrodynamisches Modell und ein Sedimenttransportmodell für das eigens innerhalb des Forschungsvorhabens eingerichtete Testgebiet „Ockholm“ aufgebaut. Ein Vergleich mit Messungen in der Natur erlaubte eine Aussage über die Qualität der numerischen Ansätze.

Aufbauend auf den so gewonnenen Erkenntnissen wurden in einer Parameterstudie Detailuntersuchungen zu Sedimentations- und Erosionsvorgängen durchgeführt und auf vergleichende Aussagen bei unterschiedlichen Lahnungsgeometrien, baulichen Ausführungen und hydrodynamischen Randbedingungen analysiert.

Das prinzipielle Systemverhalten konnte abgeleitet werden. Mit den Ergebnissen stehen dem Praktiker Anhaltspunkte für die Auswahl einer den örtlichen Verhältnissen angepassten Ausführungsvariante zur Verfügung. Mit Hilfe der angewandten numerischen Simulationsmodelle können auch innerhalb kurzer Zeit optimierte Ausführungsvarianten konzipiert werden, die auf die örtlichen Bathymetrieverhältnisse, den einlaufenden Seegang und die sedimentologischen Randbedingungen zugeschnitten sind.

Summary

In the KFKI-project MTK 0564 "Optimization of coastal protection measures in forelands of the german north sea coast" (partial project "Investigation of waves in sedimentation fields enclosed by brushwood fences"), supported by the German Ministry for Education and Research, in addition to theoretical studies and physical models, numerical model tests for sedimentation and erosion processes in sedimentation fields were carried out.

A wave model, a hydrodynamic model and a sediment transport model for the test area "Ockholm", which was especially established for this research project, were built using the simulation package MIKE21® (DANISH HYDRAULIC INSTITUTE). Comparing results with field measurements led to a numerical parameter study on sedimentation and erosion processes in the sedimentation fields. The influence of system geometry, different construction of brushwood fences and hydrodynamic scenarios were analyzed.

The principal system behaviour could be shown. The results are a good basis for practical selection of construction variants considering local conditions. With the applied numerical simulation models it is possible to find optimized system variants, adapted to local bathymetry, incoming waves and sediment conditions.

Inhalt

1. Aufgabe und Wirkungsweise von Lahnungen	162
2. Grundlagen der numerischen Simulation	164
2.1 Allgemeines	164

2.2 Hydrodynamisches Modell	164
2.3 Seegangmodell	165
2.4 Sedimenttransportmodell	166
3. Untersuchungen im Testgebiet „Ockholm“	167
3.1 Allgemeines	167
3.2 Systemparameter und Randbedingungen	167
3.3 Verifikation und Kalibrierung	170
3.4 Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen bei mittleren Tideverhältnissen	171
3.5 Seegangsverhältnisse	174
3.6 Sedimentations- und Erosionsprozesse	175
4. Parameterstudie zum Einfluß von Öffnungsbreite, Begrüppung, Anwurf und zusätzlichen Lahnungsfeldern	177
4.1 Allgemeines	177
4.2 Systemparameter und Randbedingungen	178
4.3 Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen bei mittleren Tideverhältnissen	180
4.3.1 Einfluß der Öffnungsweite	180
4.3.2 Einfluß der Begrüppung	181
4.3.3 Einfluß des Anwurfs	183
4.3.4 Einfluß der Feldanzahl (Einfachgeometrie – Doppelgeometrie)	183
4.4 Seegangsverhältnisse	183
4.5 Sedimentations- und Erosionsprozesse	184
4.5.1 Einfluß der Öffnungsweite	184
4.5.2 Einfluß von Begrüppung und Anwurf	184
4.5.3 Einfluß der Feldanzahl (Einfachgeometrie – Doppelgeometrie)	184
4.5.4 Bilanzierung der Sedimentmengen	186
5. Diskussion und Wertung der Ergebnisse	187
6. Schriftenverzeichnis	189

1. Aufgabe und Wirkungsweise von Lahnungen

Mit der Tideströmung, die von seegangserzeugten Strömungen überlagert wird, werden Sedimente (Sinkstoffe) in das Küstenvorfeld transportiert und abgelagert, sobald die Turbulenz der Strömung reduziert und ihr Transportvermögen kleiner wird. Dieser Vorgang erfolgt auf natürlichem Wege auf ausgedehnten Wattflächen, in Buchten, Hafenbecken oder an den geschützten Leeseiten von Inseln, Halligen und Dämmen.

Mit Hilfe planmäßiger Eingriffe in die Strömungsabläufe kann die Ablagerung von Sedimenten künstlich gefördert werden. So wurde entlang der Nordseeküste durch schachbrettartig neben- und voreinandergereihte Felder ein Netz von beruhigten Wasserbereichen geschaffen. Die noch turbulente welleninduzierte Wasserbewegung und Strömung wird durch diese sogenannten Lahnungsfelder und zaunartigen Bauwerke (Buschlahnungen) weitgehend reduziert und damit die natürliche Ablagerung der feinen Sinkstoffe aus dem Meerwasser beschleunigt (Abb. 1).

In der parallel zum Deich verlaufenden Lahnung (auch als Querlahnung bezeichnet) befindet sich eine Öffnung, so daß bei steigendem Tidewasserstand die Sedimentationsfelder überflutet und bei fallenden Wasserständen wieder entwässert werden. In der Stillwasserzeit um die Kenterung der Tide nach Hochwasser lagert sich der Großteil der Schweb- und Sinkstoffe am Boden ab. Aufgabe der senkrecht zum Deich verlaufenden Hauptlahnungen (auch als Längslahnungen bezeichnet) ist es, parallel zur Küste verlaufende Längsströmungen zu unterbinden, während die Querlahnungen vorwiegend für eine Strömungs- und Seegangsberuhigung in den Lahnungsfeldern sorgen.

Lahnungen werden in der Regel als Buschlahnungen ausgeführt, die aus zwei in den Wattboden gerammten Holzpfehlreihen mit versetzt angeordneten Pfählen bestehen. In den

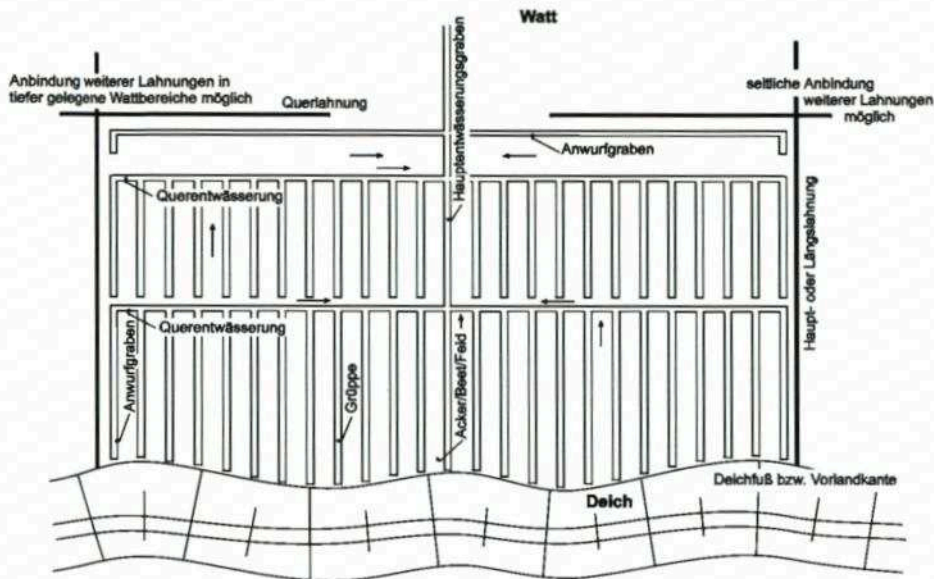


Abb. 1: Aufbau eines Lahnungsfeldes mit Entwässerungssystem (LIEBERMAN et al., 1998)

Zwischenraum der Pfahlreihen werden Faschinen eingebracht und mit einem verzinkten Draht kreuzweise zwischen den Pfählen verschnürt, und seitlich mit Boden angeworfen (Anwurf). An der Nordsee liegt die Oberkante der Lahnungen auf Höhe des MThw oder MThw + 30 cm. In Abhängigkeit von der Wathöhe, und nach Möglichkeit nicht tiefer als MThw – 0,70 m bis MThw – 0,80 m, werden Lahnungsfelder vor dem Deich als Beruhigungszone angeordnet, bevor mit fortschreitender Verlandung weitere Sedimentationsfelder in Richtung See angelegt werden (LIEBERMAN et al., 1998).

Hat das Vorland eine Höhe von etwa MThw – 0,50 m bis MThw – 0,30 m erreicht, wird zur Entwässerung ein künstliches Grabensystem aus Hauptentwässerungsgraben, Querentwässerungsgräben und „Grüppe“ in das Lahnungsfeld gezogen. Um den Abfluß in den Grüppen zu gewährleisten, wird der Boden ausgehoben und auf die Mitte des Ackers platziert. Der Aushub kann während der Tiden überflutet werden, wird jedoch bei Normaltiden nicht abgetragen, so daß eine beschleunigte Aufhöhung der Vorlandbereiche eintritt.

Aufgabe des Teilprojektes „Wellenuntersuchungen in Modell-Lahnungen“ des FRANZIUS-INSTITUTS innerhalb des Forschungsvorhabens des KFKI „Optimierung von Küstensicherungsarbeiten im Küstenvorfeld der Nordseeküste“ (gefördert durch den BUNDESMINISTER FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE, BMBF) war die Darstellung des Wissensstandes über „Lahnungen/Lahnungsfelder“ und „hydrologisch-morphologische Wechselwirkungen an kohäsiven Wattböden“. Zur Modellierung und Simulation der Vorgänge in Lahnungsfeldern waren die unter bestimmten Randbedingungen auftretenden Strömungs- und Seegangsbedingungen zu erfassen und die hydrodynamische Wirksamkeit von Lahnungen zu beurteilen. Hierzu wurden Detailuntersuchungen zum Verständnis der hydrodynamischen Wechselwirkungen am Lahnungsbauwerk in verschiedenen physikalischen Modellen durchgeführt. Die Ergebnisse dienten als Grundlage für die Simulation der Strömungs- und Seegangsverhältnisse bzw. der Sedimenttransportprozesse in numerischen Modellen.

2. Grundlagen der numerischen Simulation

2.1 Allgemeines

Grundlage der numerischen Berechnungen und Simulationen der Vorgänge in Lahnungsfeldern ist das Programmsystem MIKE21[®] des DANISH HYDRAULIC INSTITUTE (DHI, 1997a, b, c). Dieses umfaßt mehrere Module zur Modellierung der Naturprozesse. Für die Berechnung von Strömungen wurde das HD-Modul (Hydrodynamic Module) verwendet. Für die Simulation welleninduzierter Strömungen kam das EMS-Modul (Elliptic-Mild-Slope Module) zum Einsatz. Der Sedimenttransport wurde mit Hilfe des MT-Moduls (Mud-Transport Module) untersucht.

2.2 Hydrodynamisches Modell

Das hydrodynamische Modell (HD-Modul) basiert auf einem zweidimensionalen Ansatz, der auch die Betrachtung instationärer Strömungsvorgänge erlaubt. Die Beschreibung der Strömungsvorgänge erfolgt mit Hilfe der Gleichungen zur Massenerhaltung (Gl. 1) und der NAVIER-STOKES-Gleichungen (Gl. 2 und Gl. 3):

$$\underbrace{\frac{\partial \zeta}{\partial t}}_{\text{Auslenkungsänderung}} + \underbrace{\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y}}_{\text{Durchflußdivergenz}} = 0 \quad (1)$$

$$\underbrace{\frac{\partial p}{\partial t}}_{\text{lokale Beschleunigung}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right)}_{\text{advective Beschleunigung}} + \underbrace{gh \frac{\partial z}{\partial x}}_{\text{Meeresspiegelneigung}} + \underbrace{\frac{gp \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2}}_{\text{Bodenreibung}} \quad (2)$$

$$-\frac{1}{\tau_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (h \tau_{xy}) \right] - \underbrace{\Omega q}_{\text{Corioliskraft}} - \underbrace{f V V_x}_{\text{Wind-schub}} + \underbrace{\frac{h}{\rho_w} \frac{\partial p_a}{\partial x}}_{\text{Luftdruckgradient}} = 0$$

Schubspannungsdivergenz

$$\underbrace{\frac{\partial p}{\partial t}}_{\text{lokale Beschleunigung}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right)}_{\text{advective Beschleunigung}} + \underbrace{gh \frac{\partial \zeta}{\partial y}}_{\text{Meeresspiegelneigung}} + \underbrace{\frac{gp \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2}}_{\text{Bodenreibung}} \quad (3)$$

$$-\frac{1}{\tau_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h \tau_{xy}) \right] - \underbrace{\Omega q}_{\text{Corioliskraft}} - \underbrace{f V V_y}_{\text{Wind-schub}} + \underbrace{\frac{h}{\rho_w} \frac{\partial p_a}{\partial y}}_{\text{Luftdruckgradient}} = 0$$

Schubspannungsdivergenz

mit

$\zeta(x, y, t)$	Wasserspiegelauslenkung [m]
t	Zeit [s]
$p(x, y, t)$	Durchfluß in x-Richtung [m^3/s]
$q(x, y, t)$	Durchfluß in y-Richtung [m^3/s]
x, y	Raumkoordinaten [m]
f	Windreibungskoeffizient [-]
g	Erdbeschleunigung [m/s^2]
$h(x, y, t)$	Wassertiefe [m]
$p_a(x, y, t)$	Luftdruck [$\text{kg}/(\text{m s}^2)$]
$C(x, y)$	Widerstandsbeiwert nach CHEZY [$\text{m}^{1/2}/\text{s}$]
$V(x, x, t)$	Windgeschwindigkeit [m/s]
$V_x(x, x, t)$	Windgeschwindigkeit in x-Richtung [m/s]
$V_y(x, x, t)$	Windgeschwindigkeit in y-Richtung [m/s]
ρ_w	Dichte des Fluids [kg/m^3]
τ_{xx}	Schubspannungskomponente in x-Richtung [$\text{kg}/\text{m s}^2$]
τ_{xy}	Schubspannungskomponente in x-Richtung am y-Rand [$\text{kg}/\text{m s}^2$]
τ_{yx}	Schubspannungskomponente in y-Richtung am x-Rand [$\text{kg}/\text{m s}^2$]
τ_{yy}	Schubspannungskomponente in y-Richtung [$\text{kg}/\text{m s}^2$]
Ω	CORIOLIS-Parameter in Abhängigkeit vom Breitengrad [$1/\text{s}$]

Die turbulente Dissipation wurde nach SMAGORINSKY (1963) für bereichsweise konstante Wirbelviskosität realisiert und in den Schubspannungstermen in Gl. 2 und Gl. 3 berücksichtigt. In diesen Ansatz geht der Viskositätsbeiwert E als Funktion der Fließgeschwindigkeitsgradienten ein.

Die Berücksichtigung des Windschubes erfolgt in allen Knoten des Modellgebietes. Welleninduzierte Strömungen werden durch Einarbeitung entsprechender Geschwindigkeitskomponenten in die Impulsgleichungen realisiert:

$$\begin{aligned}
 \text{in x-Richtung:} \quad & \frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \\
 \text{in y-Richtung:} \quad & \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial x}
 \end{aligned} \tag{4}$$

Bei der Simulation in Ästuarien bzw. im Küstenvorfeld werden der Berücksichtigung welleninduzierter Strömungen enge Grenzen gesetzt, da die im Tidebereich notwendige tiefenabhängige Implementierung der „*Radiation Stresses*“, bei ansonsten gleichen Randbedingungen (Wellenhöhe, Wellenlänge), innerhalb des implementierten EMS-Moduls nicht realisiert ist.

2.3 Seegangsmodell

Das Elliptic-Mild-Slope Modell (EMS-Modul) ermöglicht es, zeitgemittelte Wellen auf gering geneigten Bathymetrien mit beliebigen Wassertiefen an einem diskreten Simulationszeitpunkt zu berechnen.

Das numerische Modell ist ein lineares Refraktions-Diffraktions Modell, das Wellenbrechen, Reibung und Reflexion berücksichtigt. Dämpfungsschichten (*Sponge Layers*) zur

Absorption von Wellenenergie (z. B. an einem offenen Rand) können eingearbeitet werden. Das Modell beinhaltet eine generelle Formulierung der „*Radiation Stresses*“. Diese treten jedoch nur bei sich kreuzenden Wellenzügen und bei starker Diffraktion merklich in Erscheinung und gewinnen in diesem Falle an Einfluß. Die Grundgleichungen zur Massen- und Impulserhaltung lauten:

$$\nabla (C_g C \nabla \zeta) = \frac{C_g}{C} \frac{\partial \zeta}{\partial t^2} \quad (5)$$

mit

- C_g Gruppengeschwindigkeit [m/s]
- C Wellengeschwindigkeit [m/s]
- ζ Wasserspiegelauslenkung [m]

Die verallgemeinerte Grundgleichung beinhaltet Wellenerzeugung, Wellendämpfung (Adsorption), partielle Reflektion, Sohlreibung und das Brechen von Wellen (WARREN et al., 1985; MADSEN u. LARSEN, 1987).

Die Wellengeschwindigkeit bzw. die Gruppengeschwindigkeit sind anhängig von der Wassertiefe. Durch Sohlreibung verlieren die Wellen einen Teil ihrer Energie. Bei monochromatischen Wellen bzw. RAYLEIGH-verteilten Wellen kommen unterschiedliche Ansätze zur Anwendung. Der in diesen Ansätzen enthaltene Verlustbeiwert f_e wird als Funktion des NIKURADSE-Rauheitsbeiwertes k_n dargestellt (SWART, 1974). Das Modell benutzt zur Berechnung des Energieverlustes der Wellen die Gleichung nach BATTJES u. JANSSEN (1978). Die partielle Reflektion an geneigten Wellenbrechern bzw. an Wellenbrechern mit rauher Oberfläche wird nach MADSEN u. LARSEN (1987) beschrieben. Bei Unterwasserwellenbrechern oder bei permeablen Wellenbrechern muß zusätzlich zur Reflektion noch die Wellentransmission über oder durch den Wellenbrecher berücksichtigt werden (MADSEN, 1983).

Der hier benutzte Ansatz für die Berechnung der „*Radiation Stresses*“ wurde von COPELAND (1985) formuliert. Die durch Wellen induzierten „*Radiation Stresses*“ werden durch entsprechende Geschwindigkeitskomponenten in die Impulsgleichungen des hydrodynamischen Modells eingearbeitet.

2.4 Sedimenttransportmodell

Für die Beschreibung der advektiven bzw. dispersiven Sedimenttransportprozesse unterschiedlicher Fraktionen wird die zweidimensionale Transportgleichung gelöst:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v_x \frac{\partial c}{\partial x} + v_y \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(h D_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(h D_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + Q_L C_L \frac{1}{h} - S \quad (6)$$

mit

- c Konzentration [g/m^3]
- v_x Fließgeschwindigkeit in x-Richtung [m/s]
- v_y Fließgeschwindigkeit in y-Richtung [m/s]
- D_x Dispersionskoeffizient in x-Richtung [m^2/s]
- D_y Dispersionskoeffizient in y-Richtung [m^2/s]

- S Depositions- bzw. Erosionsterm [$\text{g}/(\text{m}^3 \text{ s})$]
 Q_L Quellterm bezogen auf die Grundfläche [$\text{m}^3/(\text{s m}^2)$]
 C_L Konzentration des durch den Quellterms eingebrachten Volumens [g/m^3]

Die Ansätze für die fraktionsabhängige Beschreibung von Diffusions- und Dispersionsprozessen berücksichtigen molekulare und turbulente Diffusion, Dispersion (im Bereich einer Zelle) und Makrodispersion (im gesamten Modellgebiet). Sie werden durch einen Dispersionsansatz nach ELDER (1959) beschrieben. Die Simulation der Depositions- und Erosionsvorgänge erfolgt für die auftretenden Fraktionen (kohäsiv bzw. nicht kohäsiv) und in Abhängigkeit des auftretenden Strömungszustandes. Die Ansätze für nicht kohäsive Sedimente werden für Fraktionen mit einem Korndurchmesser größer 60 μm angewendet.

Die verwendeten Ansätze zur Beschreibung der Sedimentations- und Erosionsprozesse kohäsiver und nicht kohäsiver Sedimente sind u. a. in VAN RIJN (1993) ausführlicher beschrieben.

3. Untersuchungen im Testgebiet „Ockholm“

3.1 Allgemeines

Eingangsparameter für die verschiedenen Modelle (Morphologie, Hydrologie, Seegang und sedimentologische Parameter) wurden aus Messungen in der Natur im Testgebiet „Ockholm“ gewonnen bzw. aus physikalischen Versuchen im Wellenkanal bzw. der Strömungsrinne des FRANZIUS-INSTITUTS (Permeabilität der Lahnungsbauwerke) abgeleitet. Ein Vergleich für das Testgebiet „Ockholm“ mit in der Natur gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten und Sedimentations- und Erosionsraten in diesem Gebiet erlaubte eine erste Einschätzung über die Güte der auf numerischem Wege gewonnenen Ergebnisse.

3.2 Systemparameter und Randbedingungen

Die Lahnungsfelder im Testgebiet „Ockholm“ sind in Abb. 2 dargestellt. Die Lahnungsfelder wurden hier in einer Größe von ca. 200 m \times 200 m (seeseitige Felder) bzw. 200 m \times 300 m (deichseitiges Feld) in zweireihiger Anordnung realisiert. Das für das hydrodynamische Modell gewählte Rechengitter hat eine Diskretisierungsweite von 2 m. Damit ergeben sich bei einer Zeitschrittlänge von 2 s COURANT-Zahlen, die unterhalb des kritischen Grenzwertes von 1 liegen.

Der seeseitige Rand des numerischen Ersatzsystems ist offen, die verbleibenden drei Ränder des Modellgebietes sind geschlossen. Über den seeseitigen Rand wird die Tide als Wasserstandsbedingung eingesteuert. Da das Programmsystem MIKE21® keine negativen Tidewasserstände verarbeitet, wurde die Tidekurve aus der mittleren Tidekurve für die Abflußjahre 1981 bis 1990 des Pegels „Schlüttsiel“ durch Festlegung eines neuen Bezugshorizontes höhenmäßig verschoben. Die ausgewählte Tidekurve beschreibt somit die mittleren Tideverhältnisse im Testgebiet „Ockholm“. Die Höhenlage 0,0 m entspricht 5,45 m über PN (NN + 0,45 m). Aus Stabilitätsgründen wurden die ersten drei Zeilen des offenen Randes mit einem Rauheitskoeffizienten von 8 $\text{m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ versehen. Die Strömungsrichtung wurde senkrecht zur Küste gewählt. Der Einfluß von Wind auf die Wasserspiegellage wurde vernachlässigt.

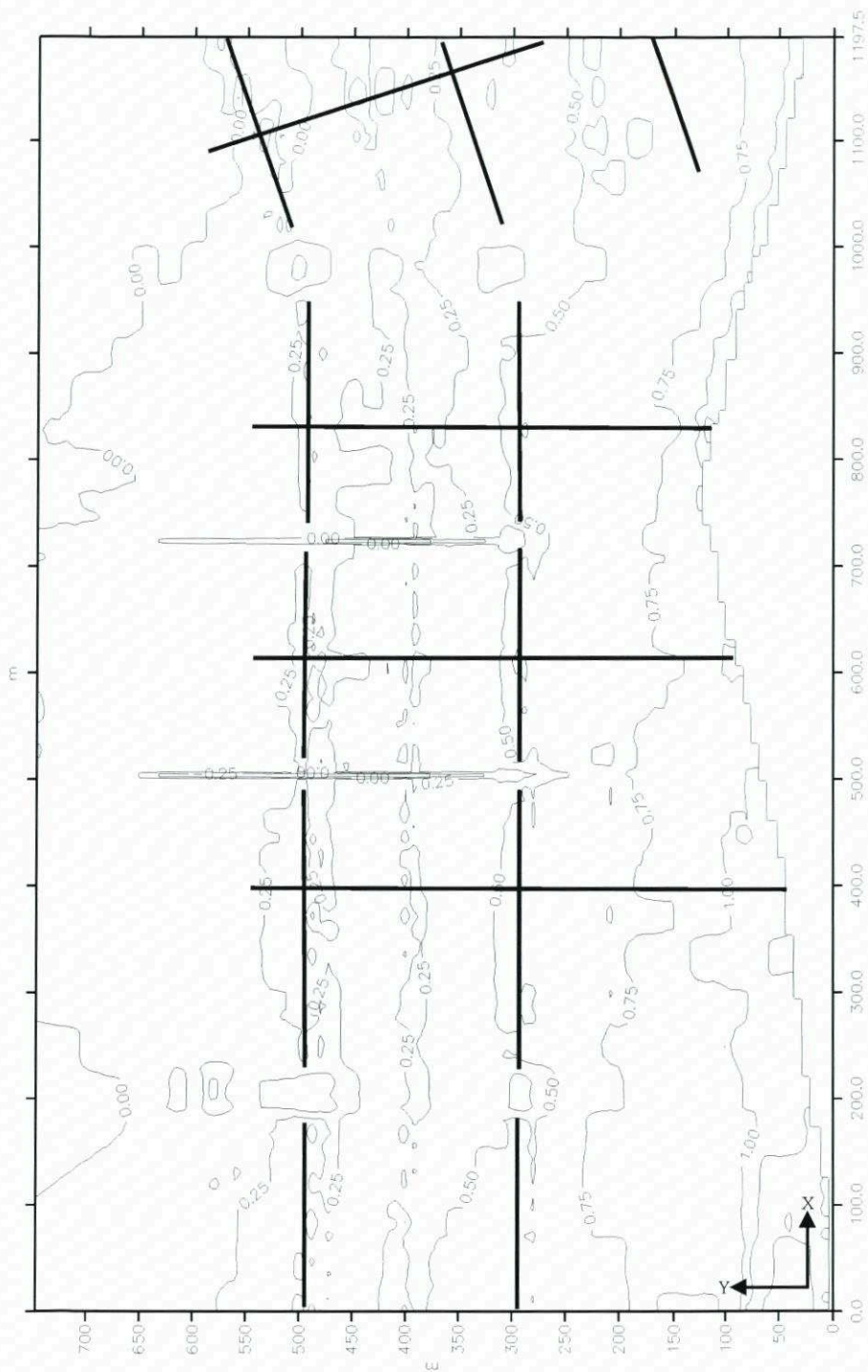


Abb. 2: Bathymetrie im Testgebiet „Ockholm“ in m über Bezugshorizont
(Distanzen in x- und y-Richtung in [m]) und Lage der vorhandenen Lahnungsfelder

Die verwendete Bathymetrie ist in Abb. 2 dargestellt. Erkennbar sind die bereits angelegten Hauptentwässerungsgräben im Bereich der mittleren Lahnungsfelder. Anwurf und Gruppen waren zum Zeitpunkt der Kalibrierung noch nicht erstellt. Die Höhe der Lahnung wurde so gewählt, daß sie bei mittleren Tideverhältnissen nicht überströmt wird.

Die Durchlässigkeit der Lahnungsbauwerke wurde, aufbauend auf den in der Strömungsrinne des FRANZIUS-INSTITUTS durchgeführten Versuchen, zu 20 % angenommen und durch eine Modifizierung der lokalen Sohlrauheit im numerischen Modell realisiert. Hierzu wurde der MANNING-STRICKLER-Rauheitswert für eine Gitternetzreihe im Bereich des Lahnungsbauwerkes mit $1,25 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ angenommen. Dieser Wert wurde aus einem numerischen Modell abgeleitet, das parallel zu den physikalischen Versuchen im Wellenkanal des FRANZIUS-INSTITUTS aufgebaut wurde, um das Transmissionsverhalten von Buschlahnungen nachzubilden. Eine sich zeitlich verändernde Durchlässigkeit (Eintrag von Sand in das Lahnungsbauwerk und Wachstum von Algen) wurde nicht berücksichtigt.

Für das Testgebiet „Ockholm“ wurden die Wellenparameter (Wellenhöhe H_s und Wellenperiode T_p) aus Messungen in der Natur abgeleitet (Tab. 1). In der numerischen Simulation wurden die Wellenhöhen in Abhängigkeit von der Wassertiefe als Ausgangswellenhöhe definiert und am oberen Rand des Modellgebietes eingesteuert. Die Wellenperiode wurde einheitlich zu $T_p = 3 \text{ s}$ angenommen. Innerhalb des EMS-Moduls ist das Modellgebiet derart aufgelöst, daß die auftretenden Wellen in ihrer Länge durch mindestens 15 Gitterpunkte (Diskretisierungsweite 0,50 m) beschrieben werden.

Tab. 1: Wellenhöhe in Abhängigkeit von der Wassertiefe im Bereich der Lahnungsöffnung

Wellenhöhe H_s [cm]	Wassertiefe [m]
8	0,4
10	0,5
15	0,6
20	0,8
23	0,9

Tab. 2: Parameter für die berücksichtigten Fraktionen innerhalb des Sedimenttransportmodells aus Messungen im Testgebiet „Ockholm“ bzw. nach Literaturwerten aus VAN RIJN (1993)

	Frakt. 1 (1 μm)	Frakt. 2 (6 μm)	Frakt. 3 (10 μm)
Krit. Depositionsgeschw. [m/s]	0,05	0,06	0,07
Krit. Erosionsgeschwindigkeit [m/s]	0,30	0,30	0,30
Mittl. Sinkgeschwindigkeit [m/s]	$7,3 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$7,3 \cdot 10^{-5}$
Rel. Höhe des Sedimenteintrags [-]	0,3	0,3	0,3
Erosionskoeffizient [kg/s/m^2]	0,0005	0,0005	0,0005
Anteil der Fraktion am Sohlzustand [%]	30	65	5
Dispersionskoeff. in x-Richtung [m^2/s]	0,1	0,1	0,1
Dispersionskoeff. in y-Richtung [m^2/s]	0,1	0,1	0,1
Sedimentkonz. am seeseitigen Rand [g/m^3]	105,0	227,5	17,5

Die Lahnungsbauwerke wurden als durchlässige Wellenbrecher aufgefaßt und als solche über einen Transmissionskoeffizienten (zweidimensionale Parameterverteilung) im numerischen Modell abgebildet. Der Parameter wurde mit Hilfe von Transmissionsversuchen im Wellenkanal des FRANZIUS-INSTITUTS zu $K_T = H_T/H_i = 1,5$ (mit H_T = Wellenhöhe im Trans-

missionsbereich, H_i : Ausgangswellenhöhe) bestimmt. Das Sediment wird über den seeseitigen Modellrand in Form einer zeitlich konstanten Linienquelle mit $c_{Quelle} = 350 \text{ g/m}^3$ eingebracht (Fraktionierung vergl. Tab. 2).

3.3 Verifikation und Kalibrierung

Als Kontrollparameter für die Kalibrierung wurden die Strömungsgeschwindigkeiten und Strömungsrichtungen an insgesamt 14 Meßstationen (Abb. 3) ausgewählt.

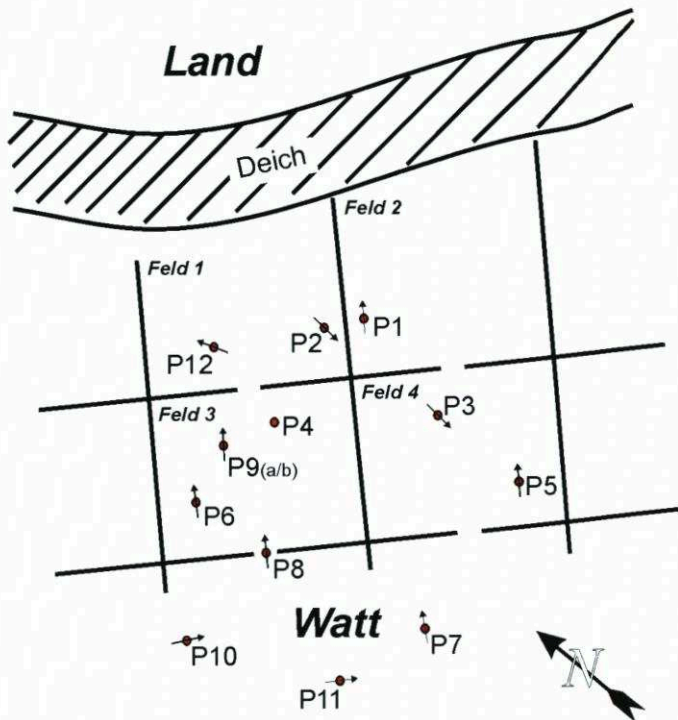


Abb. 3: Positionen der Strömungsmeßgeräte im Testgebiet „Ockholm“
(Strömungsmeßperiode vom 30. 10. bis 20. 11. 1995)

Als Eichparameter wurde der Rauheitskoeffizient gewählt. Die Kalibrierung wurde auf der Grundlage von gemessenen Strömungen bei 3 Tiden (30. 10. 1995, 6. 11. 1995 und 10. 11. 1995) durchgeführt. Die Sohlrauheit wurde als MANNING-Zahl angegeben und für das gesamte Modellgebiet aufgrund der Kalibrierung zu $35 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ festgelegt. Ergebnisse der Eichung sind beispielhaft für die Tide vom 6. 11. 1995 für die Meßstation P 3 in Abb. 4 dargestellt.

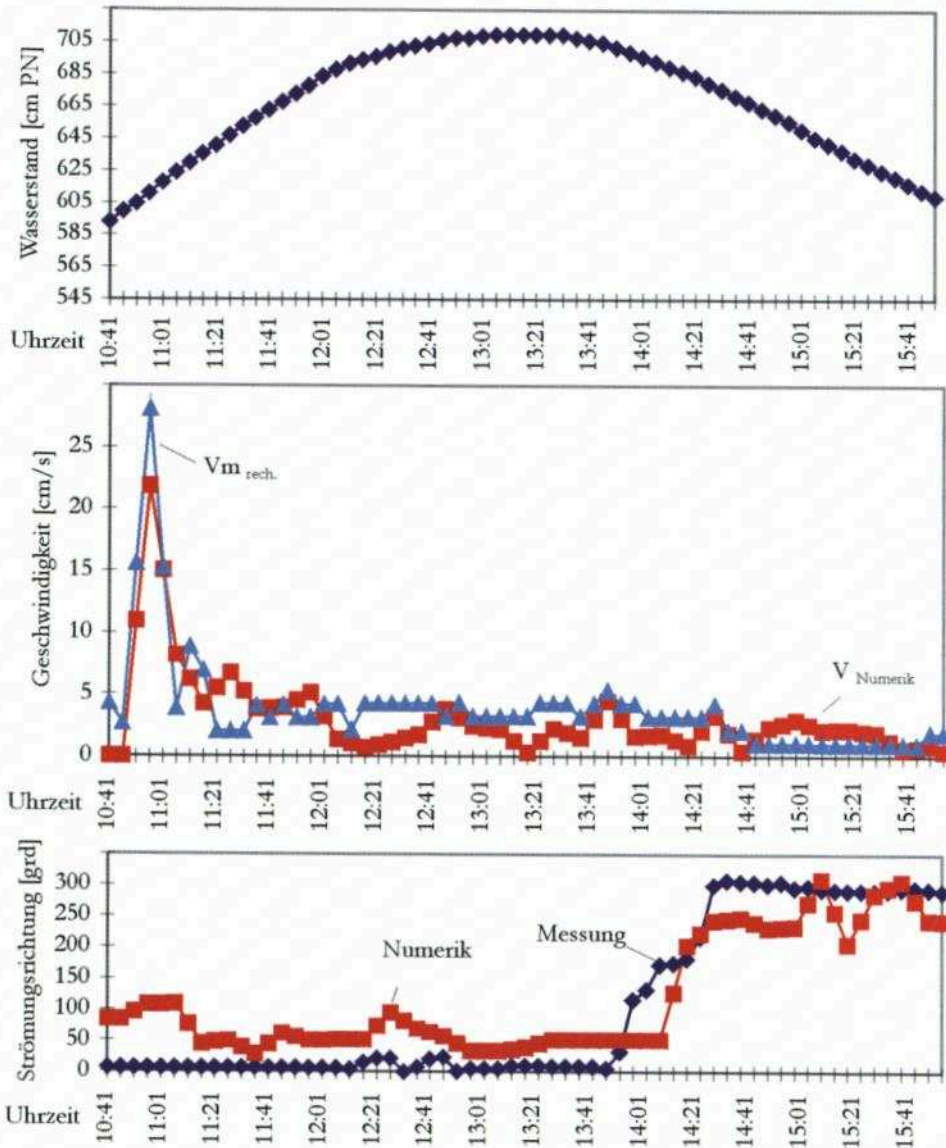


Abb. 4: Ergebnisse der Kalibrierung an der Meßstation P 3
(Tidekurve am Pegel Schlüttsiel vom 6. 11. 1995)

3.4 Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen bei mittleren Tideverhältnissen

Die sich bei mittleren Tideverhältnissen einstellenden Strömungszustände sind im folgenden für 8 ausgewählte Punkte innerhalb der Lahnungsfelder (P1 bis P8, Abb. 5) beschrieben.

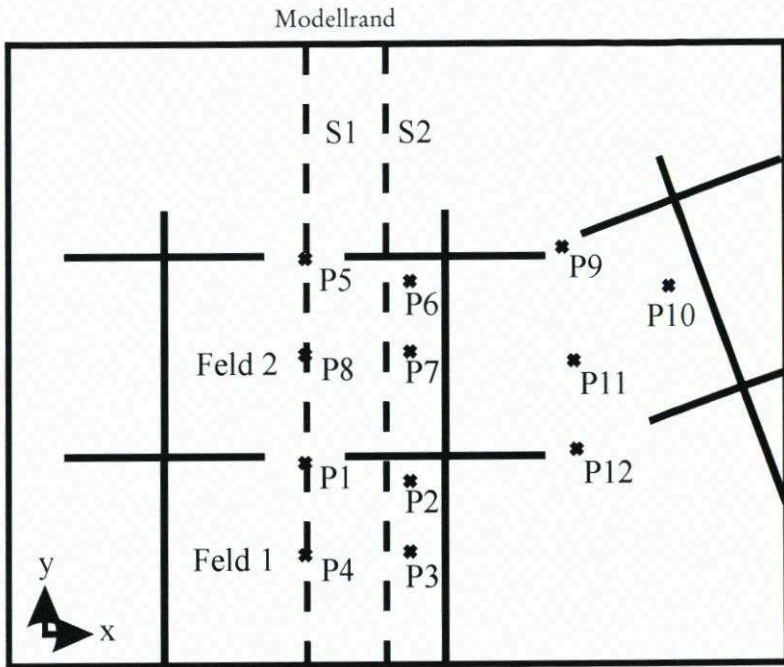


Abb. 5: Lage ausgewählter Referenzpunkte zur Darstellung von Strömungsgeschwindigkeiten im Testgebiet „Ockholm“ (schematisch)

Für die Darstellung der Ergebnisse wurden die Strömungsgeschwindigkeiten in x- bzw. y-Richtung aufgetragen (Abb. 6).

Die Strömungsgradienten zwischen der Mittelachse der Lahnungsfelder (y-Achse mit P5, P8, P1, P4) und den Randbereichen (P6, P7, P2, P3) sind im Feld 2 merklich größer als im Feld 1, was mit Beobachtungen in der Natur übereinstimmt. Erosionsbereiche sind aufgrund der berechneten Strömungsverteilungen somit nur im Bereich der Lahnungsöffnungen zu erwarten.

Die Strömungsgeschwindigkeiten entsprechen in ihrer räumlichen Verteilung den natürlichen Verhältnissen (beispielhaft in Abb. 7 dargestellt). Erkennbar sind die auf die Lahnungsöffnungen hin ausgerichteten Ebbeströmungen. Die geringe Durchströmung der Lahnungsbauwerke zeigt sich durch die in diesem Bereich niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten. Um Tidehochwasser sind die während des Füllvorganges entstandenen langsam drehenden Walzen in den Ecken der Lahnungsfelder mit Strömungsgeschwindigkeiten bis ca. 0,05 m/s noch vorhanden (ohne Abb.). Das Einströmen durch breitere Öffnungen als in den Testfeldern zeigt sich in den neben den Testfeldern liegenden Lahnungsfeldern. Hier treten breitere Bereiche mit höheren Strömungsgeschwindigkeiten auf als in den Bereichen mit schmalen Öffnungen und einer Konzentration der Einströmung auf die Hauptentwässerungsgräben.

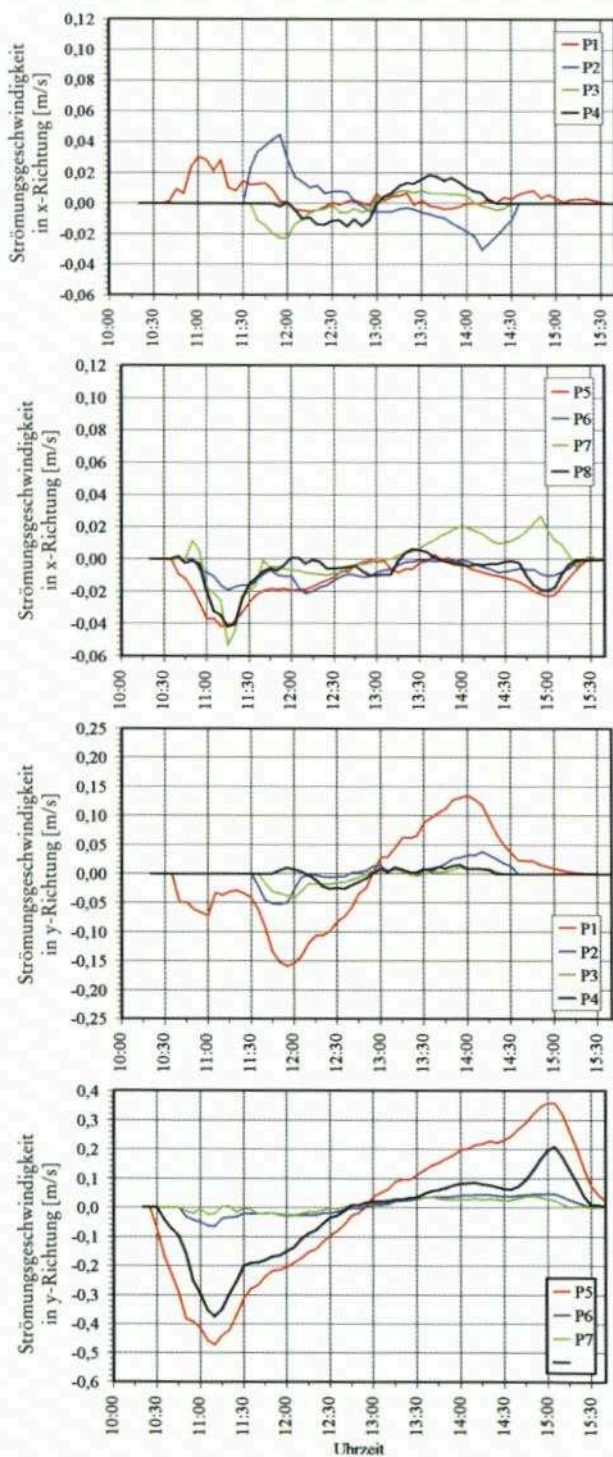


Abb. 6: Strömungsgeschwindigkeiten in x- und y-Richtung [m/s] an den Referenzpunkten P1 bis P8

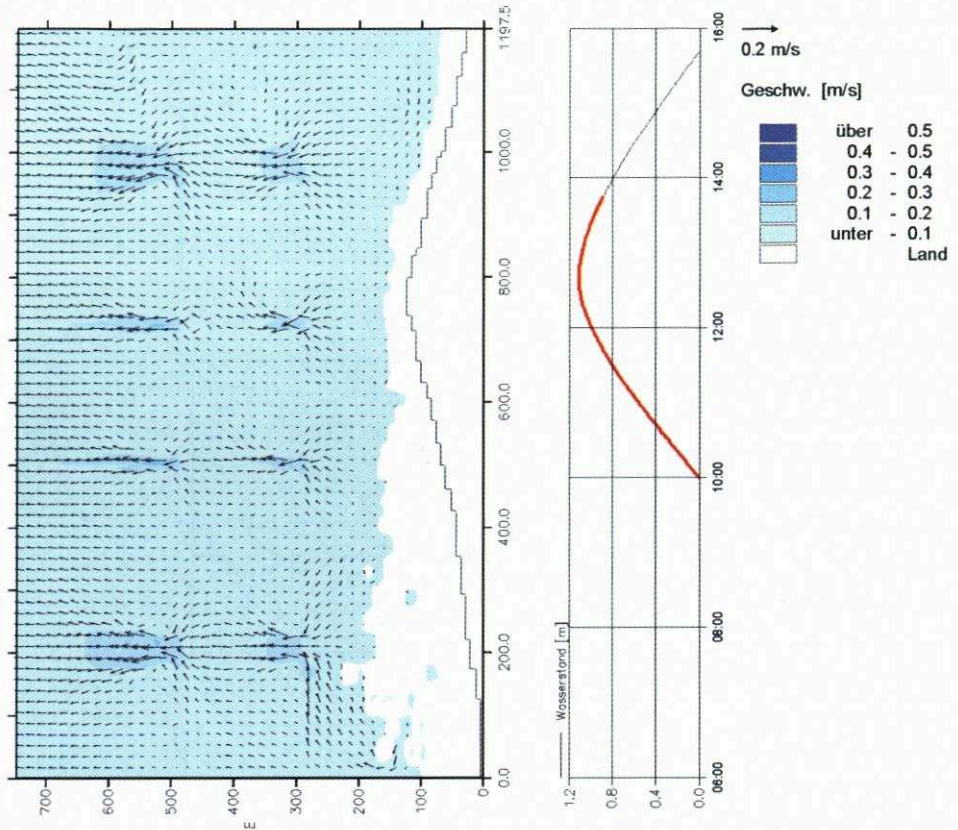


Abb. 7: Strömungsgeschwindigkeiten im Testgebiet „Ockholm“ bei mittleren Tideverhältnissen zum Zeitpunkt 13.45 Uhr (Bezugshorizont der Simulationstide: 0 m BH = 545 cm PN Pegel Schlüttsiel)

3.5 Seegangsverhältnisse

Für das Testgebiet „Ockholm“ wurden die in Tab. 1 dargestellten Fälle untersucht. Im Schnitt S1 (Schnitt durch die Lahnungsöffnung) verringert sich die Wellenhöhe bis zum Erreichen der Lahnungsöffnung, bedingt durch den lokal vorhandenen Hauptentwässerungsgraben und die damit einhergehende Vertiefung, relativ schnell. Durch die im weiteren Verlauf des Hauptentwässerungsgrabens abnehmende Wassertiefe baut sich die Welle erneut auf (Shoaling-Effekt für $d/L_0 < 0,05$) und bricht innerhalb des ersten Lahnungsfeldes am Ende des Hauptentwässerungsgrabens. Infolge des ungehinderten Einlaufens durch die Lahnungsöffnung wird ein Großteil der Wellenenergie im Schnitt S1 in das zweite Lahnungsfeld eingetragen und führt hier zu einer Erhöhung der Wellenhöhe. Damit ist die Ausgangswellenhöhe nahezu erreicht.

Im Vergleich hierzu kommt es im Schnitt S2 zu einer deutlichen Dämpfung im Bereich des zweiten Lahnungsbauwerkes, die sich in einer Abnahme der Wellenhöhe äußert. Danach baut sich die Welle erneut bis auf Höhen um 0,07 m auf. Infolge des Energieverlustes am zweiten Lahnungsbauwerk werden die Wellenhöhen aus dem Schnitt S1 nicht erreicht. Die Ausgangswellenhöhe wird um den Differenzbetrag (Abnahme der Wellenhöhe am zweiten

Lahnungsbauwerk) unterschritten, worin der Energieverlust am permeablen Lahnungsbauwerk (Diffraktion) deutlich wird.

3.6 Sedimentation und Erosion

Die im Verlaufe einer Modelltide im Lahnungsfeld verbleibenden Sedimentationsmengen sind in Abb. 8 dargestellt. Bei auflaufender Tide ergeben sich in den Lahnungsöffnungen der Testlahnungsfelder eng begrenzte Erosionsbereiche, die für den Fall größerer Lahnungsöffnungen wie in den neben den Testfeldern liegenden Lahnungsfeldern größer ausfallen und sich bis in die Mitte der seewärts gelegenen Lahnungsfelder fortsetzen.

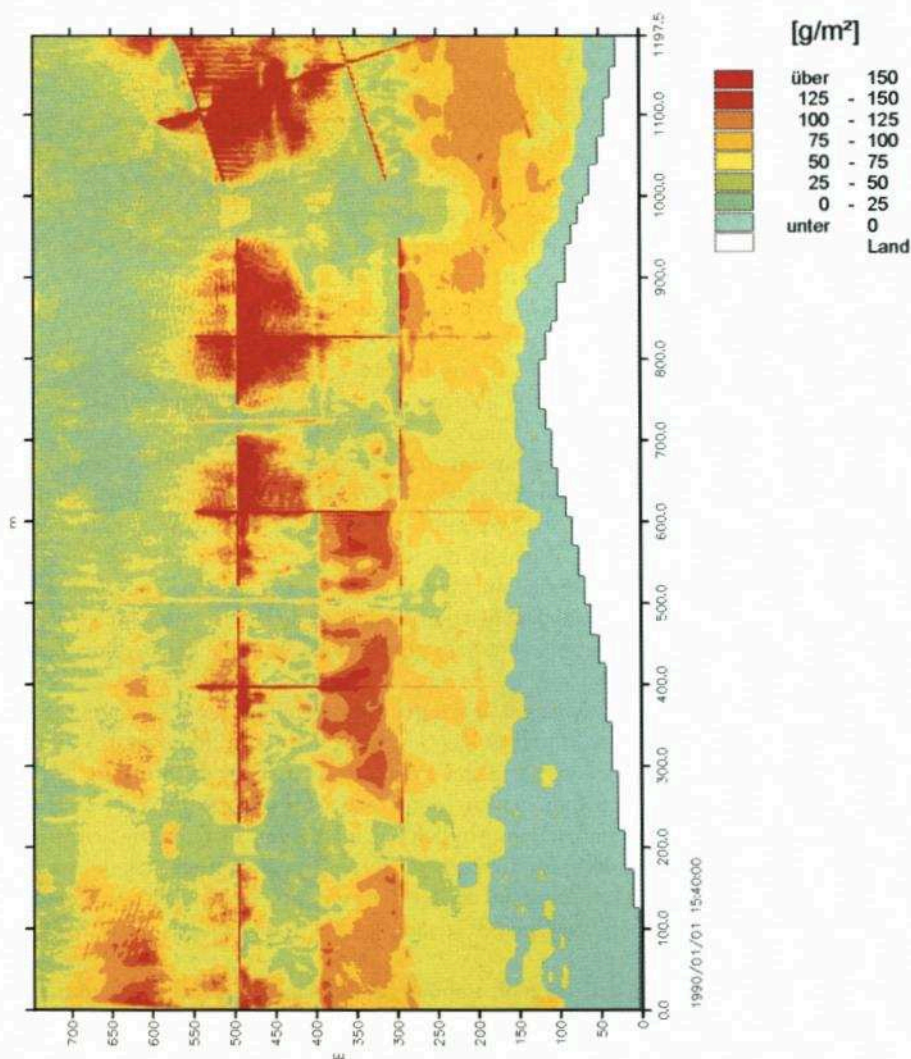


Abb. 8: Sedimentation im Testgebiet „Ockholm“ [g/m²] nach Ablauf einer Tide (15.40 Uhr) mit einem Sedimenteintrag von 350 g/m³ am seeseitigen Modellrand

In den Eckbereichen der Lahnungsfelder deuten sich schon zu diesem Zeitpunkt (11.45 Uhr, ohne Abb.) spätere Sedimentationsbereiche an. Auch im Bereich der Lahnungsköpfe außerhalb des Lahnungsfeldes sind Auflandungen erkennbar, die durch die im Staubereich der Querlahnungen geringen Strömungsgeschwindigkeiten ermöglicht werden. Im Bereich der abgeminderten Strömungsgeschwindigkeiten oberhalb der teildurchlässigen Querlahnungen zeigt sich bereits eine erhöhte Sedimentation in den Seitenbereichen der Lahnungsfelder.

Bei Tidehochwasser (12.45 Uhr, ohne Abb.) haben sich die Anlandungen, insbesondere im Bereich der Lahnungsköpfe und unmittelbar oberhalb der Querlahnungen, weiter verstärkt. Es zeigen sich auch Bereiche in den Lahnungsöffnungen bzw. im sich unmittelbar anschließenden Feldbereich mit sehr geringen Sedimentationen. Diese Bereiche haben für den Fall einer größeren Lahnungsöffnung eine wesentlich größere Ausdehnung (südöstliches Lahnungsfeld und schräg angeordnetes, nordwestliches Lahnungsfeld).

In den schräg angeordneten Lahnungsfeldern (nordwestlich der Testfelder) sind die Strömungsverteilungen bei auflaufender Tide gegenüber den Testfeldern verändert, so daß auch im küstenseitigen Lahnungsfeld Bereiche mit sehr geringen Sedimentationen auftreten. Diese sind im südöstlichen Lahnungsfeld mit ebenfalls großer Lahnungsöffnung nicht erkennbar.

Am Ende der Tidephase (Abb. 8) ergeben sich Sedimentationen in unterschiedlichen Bereichen der beiden Testlahnungsfelder und der im Nordwesten und im Südosten angrenzenden Felder. Die unterschiedlichen Ausstattungen der Lahnungszäune und der Querentwässerungen, die jeweils in der Bathymetrie berücksichtigt sind, haben hier Einfluß auf die Strömungsverteilungen und damit auf die Sedimentationsbereiche.

An der seeseitigen Querlahnung des, von See her gesehen, linken Testfeldes ist der Anwurf als Schwelle wirksam. Der Füllstrom (vorwiegend im Hauptentwässerungsgraben durch das Lahnungstor) führt zur Ausbildung von Strömungswalzen beiderseits des Hauptentwässerungsgrabens, ungestört von einer Strömung, die bei einem durchlässigen Lahnungsaun auftreten würde. In den Walzen findet Sedimentation statt. Im hinteren Teil des Feldes 2 ist die Sedimentation zwangsläufig geringer. Darüber hinaus verursacht die geringe Höhe des Aushubs aus der Querentwässerung keine Strömung (Walzen), die eine Sedimentation in diesem Bereich begünstigen würde. Die Oberflächenstruktur im Lahnungsfeld nordwestlich neben den Testlahnungsfeldern ist in ähnlicher Weise berücksichtigt wie im linken Testfeld. Deshalb ergibt sich ein ähnliches Sedimentationsbild.

Im rechten Testfeld kann sich eine Walzenströmung hinter der Querlahnung aufgrund der Durchströmung der teildurchlässigen Lahnung nicht ausbilden, so daß hier eine geringere Sedimentation im vorderen Teil des Feldes 2 auftritt als im hinteren. Im hinteren Teil des Feldes 2 wird die Sedimentation hinter dem Aushub des Querentwässerungsgrabens in der flacheren Senke stattfinden. Ähnlich wie im rechten Testlahnungsfeld werden die Querlahnung und der Aushub der Querentwässerung im südöstlich neben den Testfeldern liegenden größeren Lahnungsfeld in der Bathymetrie berücksichtigt. Die Sedimentationsbereiche liegen wie im rechten Testlahnungsfeld vor der landseitigen Querlahnung.

Beachtenswert ist zudem, daß die in die Lahnungsfelder eingetragenen Sedimentmengen vornehmlich in den seeseitigen Feldern abgelagert werden und nicht bis in die küstennahen Bereiche vordringen können. Hieraus läßt sich ableiten, daß die seeseitigen Felder erst dann anzulegen sind, wenn im küstennahen Bereich das gewünschte Geländeniveau schon nahezu erreicht ist (Tab. 3).

Tab. 3: Sedimentationsmengen in den Lahnungsfeldern des Testgebietes „Ockholm“ nach Ablauf einer Modelltide (Sedimenteintrag am seeseitigen Modellrand 350 g/m³)

			Seeseitiges Feld	Küstennahes Feld
Lahnungsfeld südöstlich der Test- lahnungsfelder; breite Öffnung ohne Hauptentwässerung	S	kg/Tide	6 002	3 447
	O _{thw}	m ²	77 000	78 000
	S _m	kg/(Tide · m ²)	0,078	0,044
Nordwestliches Testlahnungsfeld; schmale Öffnung mit Hauptentwäs- serung	S	kg/Tide	3 720	2 244
	O _{thw}	m ²	41 000	42 000
	S _m	kg/(Tide · m ²)	0,091	0,053
Lahnungsfeld nordwestlich der Testlahnungsfelder, breite Öffnung ohne Hauptentwässerung	S	kg/Tide	4 961	6 628
	O _{thw}	m ²	56 000	99 000
	S _m	kg/(Tide · m ²)	0,089	0,067

S Sedimentationsmenge im Lahnungsfeld in einer Tide
O_{Thw} Oberfläche des Lahnungsfeldes bei Thw
S_m mittlere Sedimentationsmenge im Lahnungsfeld in einer Tide

Offensichtlich behindert die kleinere Lahnungsöffnung im Testfeld die Sedimentationsvorgänge nicht. Vielmehr unterstützt sie den Absetzvorgang in Verbindung mit dem Hauptentwässerungsgraben durch die Abminderung der einlaufenden Wellen und minimiert so die in diesen Bereichen auftretenden Sohlschubspannungen. In den küstennahen Feldern sedimentiert weniger Material als in den seeseitigen Lahnungsfeldern, was durch die durchgeführten Naturmessungen im Testgebiet „Ockholm“ bestätigt wurde. Das größere Füllvolumen im küstennahen Feld des nordwestlich der Testfelder liegenden Lahnungsfeldes, das infolge des flacher ansteigenden Vorlandes größer ist als das im Südosten liegende Lahnungsfeld, wirkt sich in einer rd. 50 % größeren mittleren Sedimentationsmenge aus.

4. Parameterstudie zum Einfluß von Öffnungsbreite, Begrüppung, Anwurf und zusätzlichen Lahnungsfeldern

4.1 Allgemeines

In einer Parameterstudie wurden mit Hilfe numerischer Modelluntersuchungen zu folgenden Fragen durchgeführt:

- Welchen Einfluß auf das Systemverhalten hat die Öffnungsweite des Lahnungsbauwerkes?
- Bewirkt eine Begrüppung eine Änderung des Systemverhaltens?
- Welche Auswirkungen hat ein Anwurf an den Lahnungen?
- Kann die Sedimentation durch die Anordnung eines zweiten Feldes weiter verstärkt werden?

Als Systemverhalten werden die Strömungsgeschwindigkeiten und ihre räumliche Verteilung, die seegangsdämpfende Wirkung des Lahnungsbauwerkes und die Höhe der Sedimentations- bzw. Erosionsraten verstanden.

4.2 Systemparameter und Randbedingungen

Für diese Parameterstudie wurden die Systemparameter (Neigung der Bathymetrie, Tidewasserstände, Wellenhöhen, Wellenlänge, sedimentologische Kennwerte) aus den im Testgebiet „Ockholm“ durchgeführten Messungen in der Natur abgeleitet. Die Durchlässigkeitsbeiwerte bzw. Transmissionskoeffizienten der Lahnungen wurden aus den im Wellenkanal des FRANZIUS-INSTITUTS durchgeführten Modelluntersuchungen übernommen. Die sedimentologischen Parameter wurden aus den Naturmessungen des FTZ-Westküste abgeleitet.

Die Anzahl der Lahnungsfelder und die Öffnungsweite der Lahnungsfelder wurde variiert (Abb. 9 und Abb. 10). Die so aufgebauten Geometrievarianten wurden mit und ohne Gruppen bzw. mit und ohne Anwurf realisiert. Die Öffnungsweiten der Lahnungsfelder variieren zwischen 25 m und 90 m.

Der seeseitige Rand des Modellgebietes ist offen. Über ihn wird die Tide als Wasserstandsbedingung eingesteuert. Die verbleibenden drei Ränder sind geschlossen. Die Neigung der Wattsohle wurde schematisiert und auf 1:800 festgelegt. Diese Neigung wurde innerhalb des gesamten Modellgebietes angewendet. Das Rechengitter hat eine Diskretisierungsweite von 2 m. Die Zeitschrittlänge wurde auf 2 s begrenzt. Auf dieser Grundlage ergeben sich COURANT-Zahlen, die unterhalb des kritischen Grenzwertes von 1 liegen. Die Höhe der Lahnung wurde so gewählt, daß sie bei mittleren Tideverhältnissen nicht überströmt wird

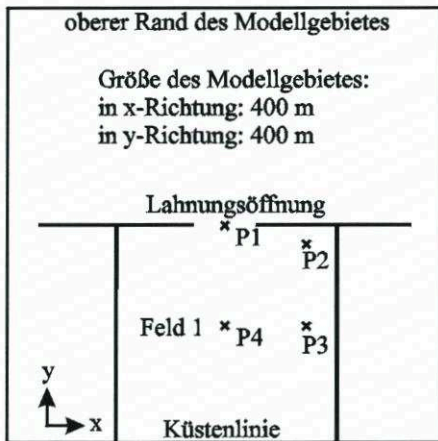


Abb. 9: Modellgebiet und Lage von Referenzpunkten (einreihige Anordnung)

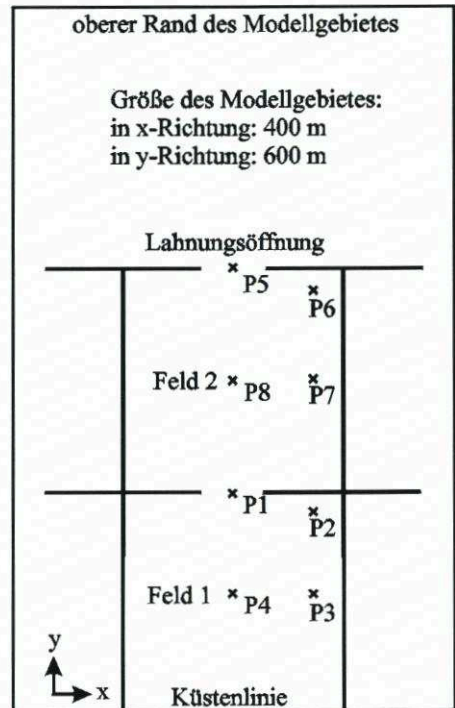


Abb. 10: Ausdehnung des Modellgebietes und Lage von Referenzpunkten für Varianten mit Doppelgeometrie (zweireihige Anordnung)

(Abb. 11). Die Durchlässigkeit wurde in Versuchen am FRANZIUS-INSTITUT mit 20 % ermittelt. Eine sich zeitlich verändernde Durchlässigkeit (Eintrag von Sediment in das Lahnungsbauwerk und Wachstum von Algen) bzw. der Abtrag des Anwurfes wurde nicht berücksichtigt. Der Anwurf wurde als wasserundurchlässig angenommen.

Die Sohlrauheit wurde als MANNING-Zahl für das gesamte Modellgebiet wie im Testgebiet „Ockholm“ zu $35 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ gewählt. Die Permeabilität und damit die Beeinflussung des Strömungszustandes durch das Lahnungsbauwerk wurde durch eine Anpassung der MANNING-STRICKLER-Rauheitskoeffizienten realisiert. Diese wurden für eine Gitternetzreihe auf $1,25 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ gesetzt.

Für die Erfassung von Grüppen wurden in die Bathymetrie Entwässerungsgräben eingefügt. Aufgrund der Gitternetzweite von 2 m sind die Anwurfgräben, die Grüppen und die Querentwässerungsgräben gleich dimensioniert. Ihre Abmessungen betragen 2 m in der Breite und 90 m in der Länge. Der Abstand der Grüppen untereinander beträgt 10 m. Am Rand werden die Grüppen bis auf 4 m an die Lahnung herangeführt. Es ergeben sich vier Hauptentwässerungsfelder, die in den Hauptentwässerungsgraben münden. Der Hauptentwässerungsgraben beginnt 4 m vor dem Deichfuß, ist 4 m breit und endet ca. 64 m seeseits der Lahnung. Er hat eine Tiefe von 40 cm. Außerhalb des Lahnungsfeldes wurde er linear bis auf die Wathöhe angehoben.

Die Höhenlage am seewärtigen Rand des Untersuchungsgebietes wurde auf $-0,1 \text{ m}$ über Bezugshorizont festgelegt. Damit ergibt sich für die Doppelgeometrie, bedingt durch deren Länge und eine Sohlenneigung von 1:800, ein um 25 cm höher liegender Landanschluß. Die

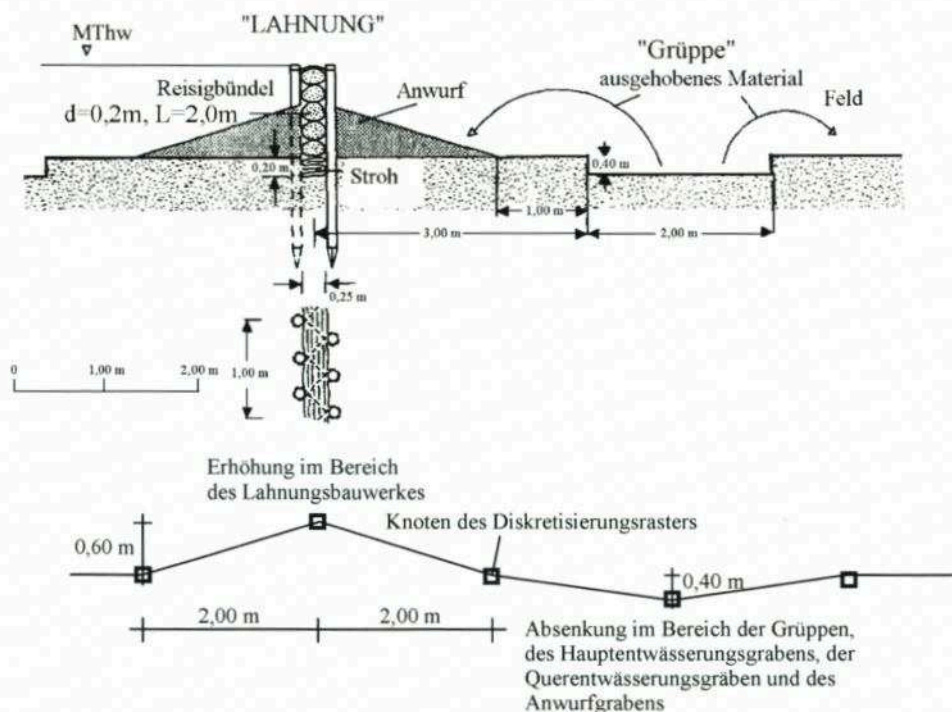


Abb. 11: Lahnungsbauwerk mit Anwurf und Gruppe und Abbildung der Geometrie (Bathymetrie) im numerischen Modell

Höhenlage des Bezugshorizontes (BH) über dem Pegelnull (PN) der Modelltide mußte deshalb für die Modellbereiche mit Einfachgeometrie bzw. Doppelgeometrie im Hinblick auf nicht zulässige negative Wassertiefen im Simulationsgebiet und auf gleiche Tidewasserstandsverläufe im landseitigen Lahnungsfeld unterschiedlich festgelegt werden. Bei Festlegung des Bezugshorizontes am landseitigen Modellrand des Modellbereiches mit Einfachgeometrie ($y = 400$ m) auf 585 cm PN herrscht bei MThw = 653 cm PN der Jahresreihe 1981/90 am Pegel „Schlüttsiel“ eine Wassertiefe am seeseitigen Modellrand bei $-0,1$ m BH von 78 cm. Bei einem seewärts um 200 m bis $y = 600$ m verlängerten Modell muß der Bezugshorizont bei einer Sohlenneigung des Vorlandes von 1:800 um 25 cm tiefer, d.h. auf 560 cm PN, gelegt werden. Bei MThw beträgt die Wassertiefe am seeseitigen Modellrand im Modell mit Doppelgeometrie bei $-0,1$ m BH dann 103 cm und bei $x = 400$ m, wie im Modell mit Einfachgeometrie, 78 cm.

Als Modelltide wurde eine die mittleren Tideverhältnisse beschreibende Tidekurve verwendet, die aus der mittleren Tidekurve der Jahresbereiche 1981/90 des Pegels Schlüttsiel abgeleitet wurde. Die Tide wird am seeseitigen Modellrand eingesteuert. Die Strömungsrichtung wurde senkrecht zur Küste gewählt. Der Einfluß von Wind wurde nicht berücksichtigt.

Wellenhöhe und Wellenperiode wurden aus dem Testgebiet „Ockholm“ übernommen (Tab. 1). Das Lahnungsbauwerk wird durch die eingesteuerten Wellen ($T_s = 3s = \text{konst.}$) nicht überströmt. „Radiation Stresses“ für eine Eingangswellenhöhe von 10 cm und eine Wassertiefe von 50 cm im Bereich der Lahnungsöffnung wurden für den Zeitraum von 11.20 Uhr bis 12.40 Uhr berücksichtigt.

Dämpfungsschichten wurden hinter der wellenerzeugenden Linie am seeseitigen Rand des Modells und am landseitigen Rand definiert. In die geschlossenen Seiten des Modellgebietes wurden ebenfalls Dämpfungsschichten eingebaut, um Reflektionen an diesen geschlossenen Rändern auszuschließen. Die Lahnungsbauwerke wurden als durchlässige Wellenbrecher aufgefaßt und als solche über einen Transmissionskoeffizienten im numerischen Modell abgebildet. Der Parameter wurde nach Transmissionsversuchen im Wellenkanal des FRANZIUS-INSTITUTS zu $K_T = H_T/H_i = 1,5$ (H_T : Wellenhöhe im Transmissionsbereich; H_i : Ausgangswellenhöhe) bestimmt.

4.3 Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen bei mittleren Tideverhältnissen

4.3.1 Einfluß der Öffnungsweite

In den Varianten mit Gruppen, insbesondere mit einem Hauptentwässerungsgraben im Bereich der Lahnungsöffnungen, ist bei Vergrößerung der Lahnungsöffnung keine nennenswerte Beeinflussung der Strömungsgeschwindigkeiten in y -Richtung erkennbar. Daher wurden in Tab. 4 Strömungsgeschwindigkeiten für verschiedene Öffnungsweiten an den Referenzpunkten P1 und P5 in den Lahnungstoren lediglich für Varianten ohne Begrüppung dargestellt.

Die Strömungsgeschwindigkeiten in y -Richtung nehmen bei Vergrößerung der Öffnungsweite ab. Bei Öffnungsweiten von mehr als 70 m ist die weitere Abnahme der Strömungsgeschwindigkeiten in y -Richtung nur noch gering erkennbar. Eine weitere Vergrößerung der Öffnungsweite hat keinen Einfluß auf die Strömungsgeschwindigkeiten in y -Richtung mehr.

Tab. 4: Maximale Strömungsgeschwindigkeiten in y-Richtung an den Referenzpunkten P1 und P5 in den Lahnungsöffnungen (Einfach- und Doppelgeometrie) für verschiedene Öffnungsweiten (Varianten ohne Gruppen)

Öffnungsweite [m]	Strömungsgeschwindigkeit in y-Richtung [m/s]	Öffnungsweite [m]	Strömungsgeschwindigkeit in y-Richtung [m/s]
P1: Einfachgeometrie, ohne Anwurf		P1: Einfachgeometrie, mit Anwurf	
25	0,24	25	0,42
40	0,20	40	0,29
50	0,18	50	0,23
70	0,14	70	0,15
90	0,12	90	0,13
P1: Doppelgeometrie, ohne Anwurf		P1: Doppelgeometrie, mit Anwurf	
25	0,24	25	0,42
40	0,20	40	0,29
50	0,18	50	0,22
70	0,14	70	0,16
90	0,14	90	0,13
P5: Doppelgeometrie, ohne Anwurf		P5: Doppelgeometrie, mit Anwurf	
25	0,33	25	0,53
40	0,24	40	0,37
50	0,20	50	0,28
70	0,17	70	0,20
90	0,12	90	0,16

4.3.2 Einfluß der Begrüppung

In Varianten mit Begrüppung läuft das ansteigende Wasser zunächst mit relativ hohen Fließgeschwindigkeiten in die Gräben und Gruppen ein.

Vom Hauptentwässerungsgraben wird das einlaufende Wasser in die Querentwässerungsgräben und schließlich in die Gruppen geleitet. Nach Füllung der Gruppen verlieren diese ihren strömungsführenden Einfluß. Das Wasser verteilt sich dann relativ unregelmäßig über die Beete. Hierbei entsteht ein diffuser Strömungszustand. An den Referenzpunkten P1, P4, P5 und P8 treten bei auflaufender Tide höhere Strömungsgeschwindigkeiten in y-Richtung auf als im Zustand ohne Gruppen. Das Entwässerungssystem erleichtert somit das frühzeitige Einlaufen des Wassers in das Lahnungsfeld (beispielhaft dargestellt für die Hauptströmungsrichtung in Abb. 12 und Abb. 13). Nach Flutung der Gruppen stellt sich in allen Fällen ein den Varianten ohne Begrüppung nahezu entsprechender Strömungszustand ein. Dieser hebt sich erst wieder von dem ohne Begrüppung ab, wenn bei ablaufender Tide die Gruppen beginnen trockenzufallen.

Generell tragen Gruppen zur Verminderung von Walzenbildungen innerhalb der Lahnungsfelder bei, da sie den Aufbau eines am Füllstrom durch das Lahnungstor orientierten Strömungszustandes während der ersten Flutphase unterbinden und damit die Entstehung von Walzen erst zu einem späteren Zeitpunkt möglich ist.

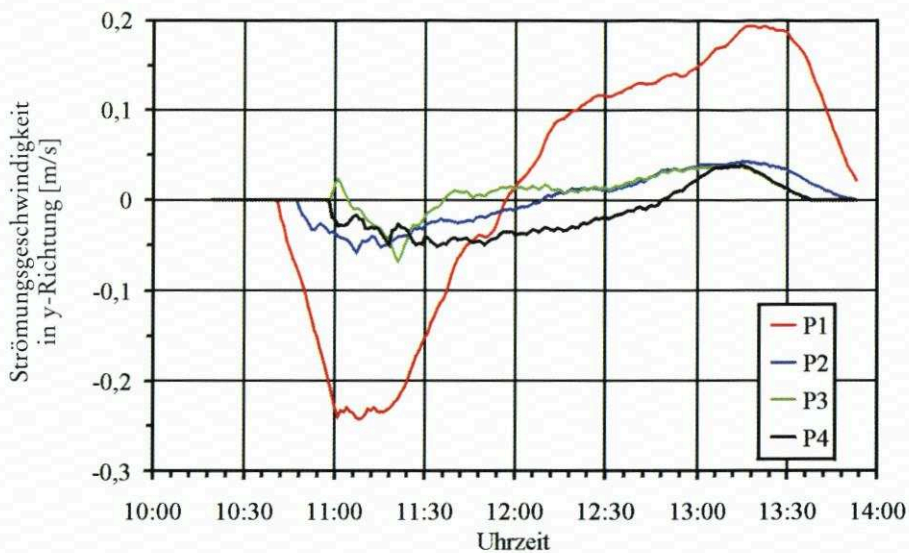


Abb. 12: Strömungsgeschwindigkeiten in y-Richtung an den Punkten P1 bis P4 (vergl. Abb. 10) (Öffnungsweite 25 m, Einfachgeometrie, ohne Anwurf, ohne Gruppen)

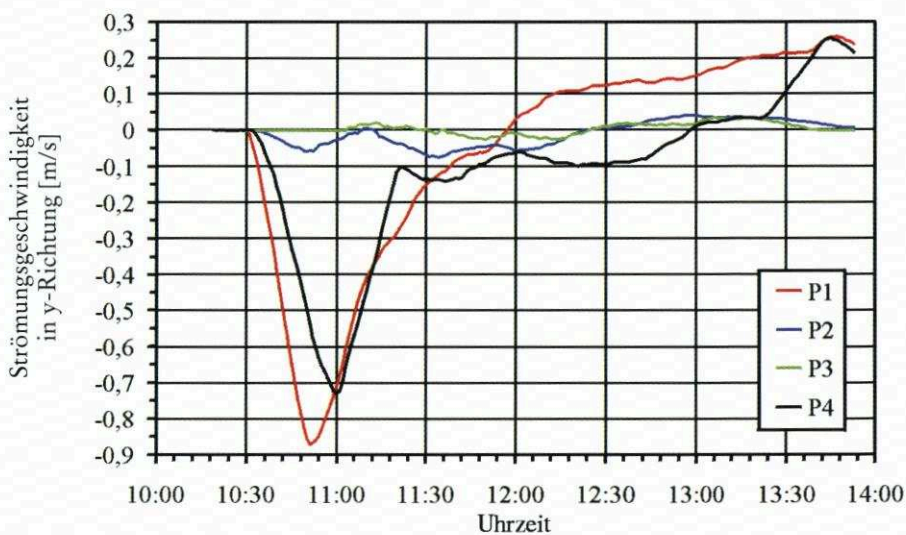


Abb. 13: Strömungsgeschwindigkeiten in y-Richtung an den Punkten P1 bis P4 (vergl. Abb. 11) (Öffnungsweite 25 m, Einfachgeometrie, ohne Anwurf, mit Gruppen)

4.3.3 Einfluß des Anwurfs

Unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten in y-Richtung zwischen den Varianten mit und ohne Anwurf ergeben sich nur für Fälle ohne Begrüppung. In diesen Varianten erhöhen sich die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten in y-Richtung im Bereich der Lahnungsöffnungen (Referenzpunkte P1 und P5). Ab einer Öffnungsweite von ca. 70 m ist dieser Einfluß des Anwurfes nicht mehr erkennbar. Die Füllung des Lahnungsfeldes kann bei Varianten mit Anwurf nur über die Lahnungsöffnung erfolgen. Die Strömungen im Lahnungsfeld können nicht mehr von den Strömungen durch die teildurchlässigen Lahnungen beeinflusst werden, sondern werden durch den Füllstrom bestimmt. Daher trägt der Anwurf maßgeblich zu Bildung von Walzen im Inneren der Lahnungsfelder bei. Die Walzen dehnen sich bei größerer Öffnungsweite stärker aus. Ihre Drehgeschwindigkeiten nehmen zu, was sich in der Vergrößerung der Strömungsgeschwindigkeiten in x-Richtung zeigt.

4.3.4 Einfluß der Feldanzahl (Einfachgeometrie – Doppelgeometrie)

Die Anordnung eines zweiten Lahnungsfeldes hat auf die Strömungsgeschwindigkeiten in y-Richtung des landseitigen Lahnungsfeldes (Feld 1) keinen Einfluß, wenn keine Begrüppung vorgenommen wurde, da diese prinzipiell ein schnelleres Einlaufen in das landseitige Feld ermöglicht. Dann entstehen im Feld 1 größere Strömungswalzen, die in den vergleichbaren Varianten der Einfachgeometrie nicht in dieser Stärke auftreten. Dies äußert sich in höheren Strömungsgeschwindigkeiten in x-Richtung im Referenzpunkt P3 (vergl. FRANZIUS-INSTITUT, 1998).

4.4 Seegangsverhältnisse

Die Wellen laufen parallel auf die (erste) Querlahnung zu. Durch das Lahnungsbauwerk wird die Wellenhöhe verringert. Nur durch die Öffnung laufen die Wellen mit nahezu gleichbleibender Höhe in das Lahnungsfeld ein. Die Wellenhöhe vermindert sich mit der Lauflänge in Richtung Ufer. Die Wellen werden an der Öffnung gebeugt, laufen in Richtung Ufer, steilen sich in diesem Bereich auf und brechen schließlich.

Bei größeren Öffnungsweiten können die Wellen nahezu ungehindert in die Lahnung einlaufen. Das heißt, die Wellenhöhe vermindert sich erst beim Auftreffen auf das Ufer, und die Bereiche hoher Wellen nahe der Lahnungsöffnung dehnen sich seitlich und in Richtung Ufer aus. Die Wellenbeugung an der Lahnungsöffnung hat bei größeren Öffnungsweiten einen geringeren Einfluß auf das Wellenbild im Lahnungsfeld. Für Varianten mit Gruppen und Anwurf hat die Öffnungsweite einen kaum wahrnehmbaren Einfluß auf die Wellenhöhen.

Als Folge einer Begrüppung treten im Lahnungsfeld höhere Wellen auf. Beim Einlaufen in den Hauptentwässerungsgraben nimmt die Wellenhöhe in diesem Bereich ab. Durch Gruppen können sich die im Bereich der Lahnungsöffnung gebeugten Wellen schneller im Lahnungsfeld entlang der Gruppen ausbreiten. Hinter der Lahnung nehmen die Wellenhöhen bei Varianten mit Begrüppung stärker zu als bei Varianten ohne Begrüppung. Ohne die Anlage von Gruppen wird das Wellenspektrum merklich eingeengt. So betragen die Wellenhöhen im Lahnungsfeld ohne Gruppen durchgängig ca. 5 cm. Mit Gruppen liegen die Wellenhöhen im Lahnungsfeld zwischen 3 cm und 8 cm.

Der Anwurf wurde bei diesen Untersuchungen als insgesamt undurchlässiges Lahnungsbauwerk angenommen. Dadurch wird für die hier eingesteuerten Wellenhöhen bei Einfachgeometrien bzw. bei Doppelgeometrien im landseitigen Lahnungsfeld eine Transmission durch die Lahnungsbauwerke verhindert. Durch Reflexion am Lahnungsbauwerk entstehen seeseitig der Lahnung höhere Wellenamplituden.

Wird eine zweite Lahnung vorgeschaltet (Doppelgeometrie), so reduzieren sich die Wellenhöhen im Feld 1 gegenüber denen in Varianten ohne vorgeschaltetes Lahnungsfeld. Für eine Öffnungsweite von 25 m dämpft das seeseitige Lahnungsfeld die auflaufenden Wellen stark ab. Für Öffnungsweiten von 90 m ist dies nicht mehr erkennbar.

4.5 Sedimentations- und Erosionsprozesse

Die Ergebnisse der Berechnungen können hier nur exemplarisch wiedergegeben werden. Eine vollständige Darstellung findet sich im Endbericht des genannten KFKI-Vorhabens.

4.5.1 Einfluß der Öffnungsweite

Bei einer Vergrößerung der Lahnungsöffnung dehnen sich die Bereiche sehr geringer Sedimentation in der Nähe der Lahnungsöffnung aus (Abb. 14). Bei allen Varianten sind am Ende der Querlahnungen Erosionsbereiche bzw. Bereiche mit sehr schwacher Sedimentation erkennbar. Bei einer Vergrößerung der Öffnungsweite wandern in Varianten ohne Begrüppung diese Bereiche auseinander. In der Mitte der Lahnungsöffnung lagert sich Material ab. Bei Doppelgeometrien kommt es im Zuge einer Verbreiterung der Öffnungsweite zu einer Ausweitung der Sedimentationsbereiche vor den Lahnungsköpfen (ohne Abb.).

4.5.2 Einfluß von Begrüppung und Anwurf

Im Bereich der Gruppen sind in allen Varianten stärkere Sedimentationen erkennbar (Abb. 15). Bei Doppelgeometrien ohne Anwurf bewirkt die Begrüppung außerdem ein verstärktes Absetzen in den seeseitigen Ecken von Feld 2. Bei Doppelgeometrie mit Begrüppung ist die Sedimentation gleichmäßiger über das Feld 1 verteilt (ohne Abb.).

Bei Einfachgeometrien mit Begrüppung ist kein Einfluß des Anwurfes erkennbar. Vor den Lahnungsköpfen kommt es bei allen Varianten zu einer stärkeren Ablagerung von Material. Für den Fall von Doppelgeometrien dehnen sich die Bereiche geringer Sedimentation in der Mitte von Feld 2 weiter aus (Abb. 16). In Feld 1 sedimentiert im küstennahen Bereich weniger Material.

4.5.3 Einfluß der Feldanzahl (Einfachgeometrie – Doppelgeometrie)

Für Varianten mit Gruppen sind die Unterschiede zwischen der Einfachgeometrie und Feld 1 der Doppelgeometrie nur in Varianten ohne Anwurf schwach zu erkennen. Insbesondere bei größeren Öffnungsweiten führt die Anordnung eines zweiten Feldes zu einer stärkeren Sedimentation vor den Lahnungsköpfen (ohne Abb.).

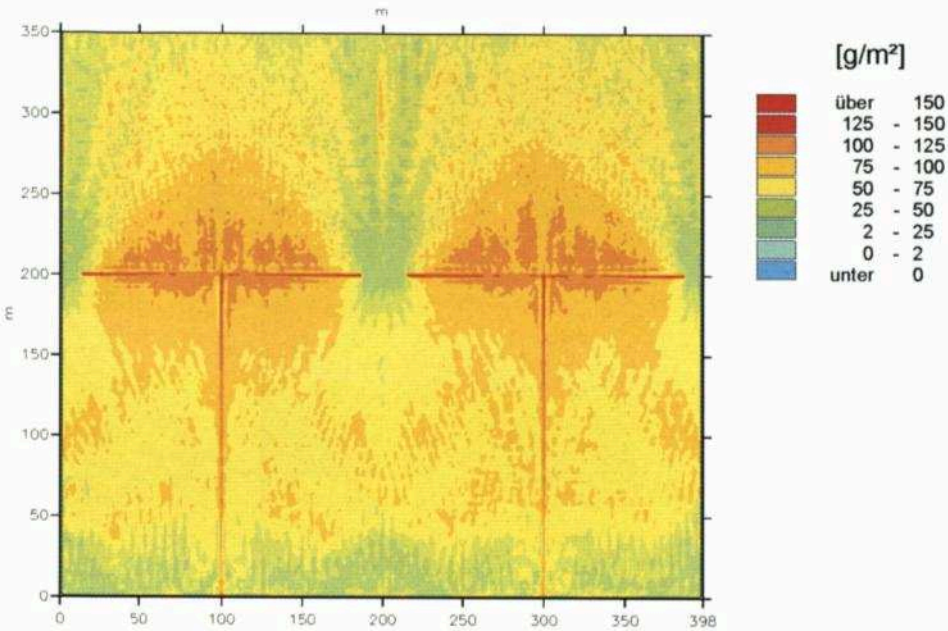


Abb. 14: Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide im gesamten Simulationsbereich (Öffnungsweite 25 m, Einfachgeometrie, ohne Gröppen, ohne Anwurf)

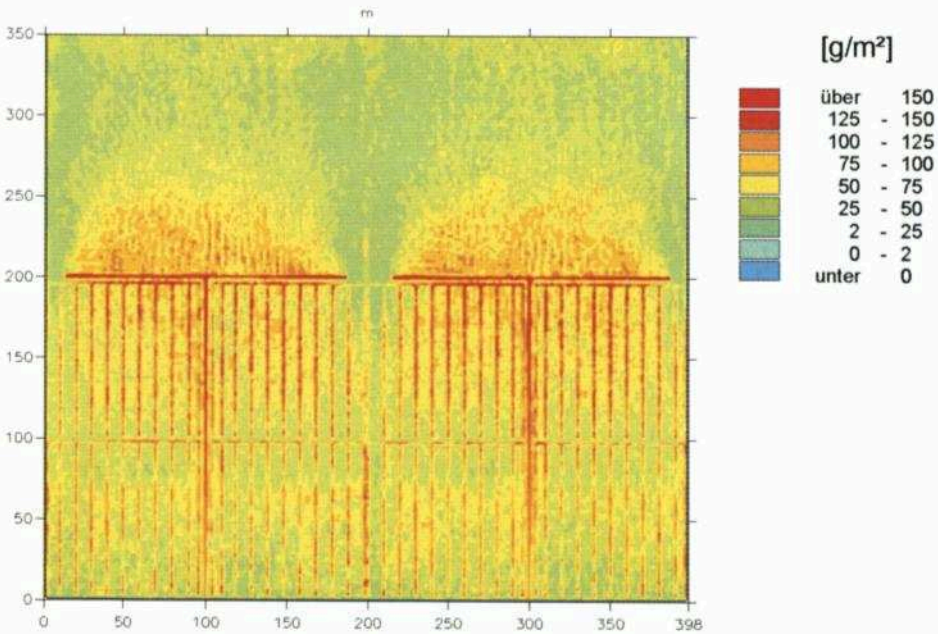


Abb. 15: Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide im gesamten Simulationsbereich (Öffnungsweite 25 m, Einfachgeometrie, ohne Anwurf, mit Gröppen)

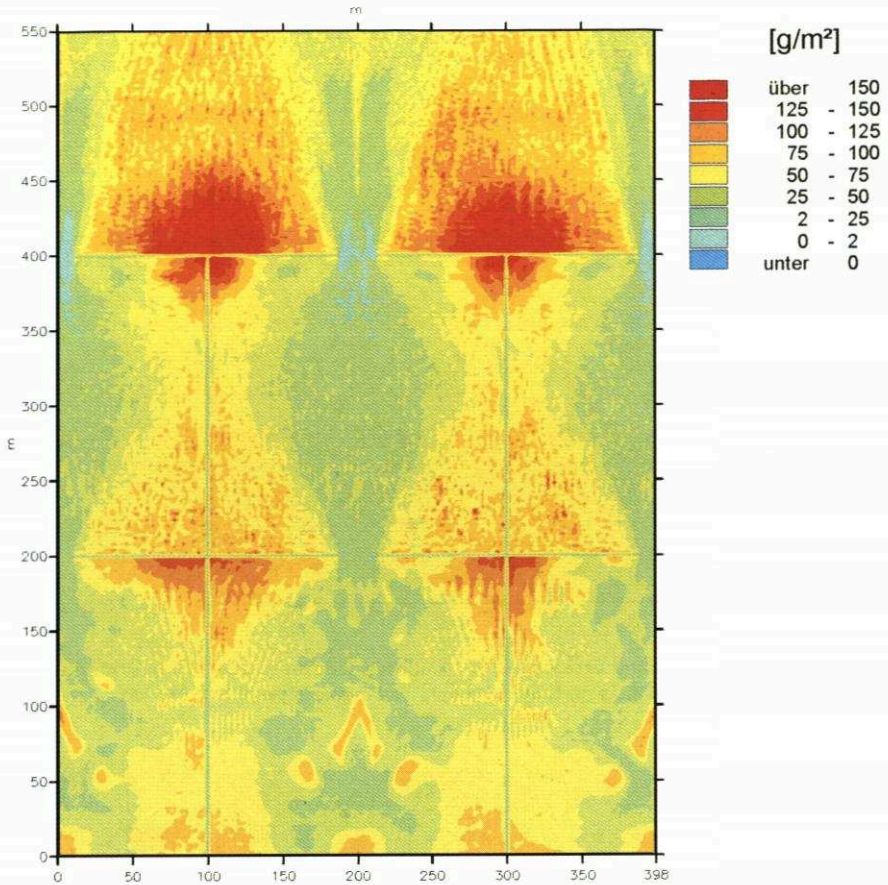


Abb. 16: Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide im gesamten Simulationsbereich (Öffnungsweite 25 m, Doppelgeometrie, mit Anwurf, ohne Gruppen)

4.5.4 Bilanzierung der Sedimentmengen

Von hohem Interesse für die Beurteilung der verschiedenen Ausführungsvarianten ist die in den einzelnen Lahnungsfeldern sedimentierte Materialmenge. In Tab. 5 sind die Varianten mit minimaler und maximaler Öffnungsweite aufgeführt. Die dazwischenliegenden Varianten zeigen eine lineare Abnahme der Sedimentationsmenge auf die Werte für maximale Öffnungsweiten.

Bei allen untersuchten Varianten nimmt die Gesamtmenge sedimentierten Materials mit zunehmender Öffnungsweite ab.

Bei Einbau eines Anwurfes nimmt die Sedimentationsmenge im Vergleich zu Varianten ohne Anwurf ab. Diese Abnahme ist bei Varianten ohne Gruppen höher als bei Varianten mit Gruppen.

Die Begrüppung der Felder führt bei den Varianten mit Anwurf zu einer Zunahme der Gesamtmenge sedimentierten Materials.

Tab. 5. Sedimentiertes Material [kg] nach Verlauf einer mittleren Tide

Fall	Öffnungsweite [m]	Feld 1 [kg]	Feld 2 [kg]
Einfachgeometrie, ohne Gruppen, ohne Anwurf			
m_01	25	2551	
m_06	90	2517	
Doppelgeometrie, ohne Gruppen, ohne Anwurf			
m_07	25	2149	2131
m_12	90	1990	2089
Einfachgeometrie, ohne Gruppen, mit Anwurf			
m_13	25	2087	
m_18	90	1739	
Doppelgeometrie, ohne Gruppen, mit Anwurf			
m_19	25	1893	1794
m_24	90	1621	1681
Einfachgeometrie, mit Gruppen, ohne Anwurf			
m_25	25	2435	
m_30	90	2169	
Doppelgeometrie, mit Gruppen, ohne Anwurf			
m_31	25	2278	2999
m_36	90	1851	2463
Einfachgeometrie, mit Gruppen, mit Anwurf			
m_37	25	3336	
m_42	90	3138	
Doppelgeometrie, mit Gruppen, mit Anwurf			
m_43	25	2475	2499
m_48	90	2185	2271

Bei der Anordnung eines zweiten Lahnungsfeldes werden die Sedimentationsmengen in Feld 2 hinzugewonnen. Die Sedimentationsmengen in Feld 1 der Doppelgeometrien liegen jedoch unterhalb der Werte vergleichbarer Einfachgeometrien, sofern keine Gruppen vorhanden sind.

5. Diskussion und Wertung der Ergebnisse

Die Simulation der Sedimentations- und Erosionsprozesse im Testgebiet „Ockholm“ basiert auf einer sich bei mittleren Tideverhältnissen einstellenden Strömungssituation. In dieser Untersuchung wurde davon ausgegangen, daß diese mittleren Verhältnisse prägend für die Vorlandbildung im Bereich von Lahnungsfeldern und die in diesem Zusammenhang ablaufenden Sedimentations- und Erosionsprozesse sind. Die durchgeführten Untersuchungen erlauben eine Einschätzung des Systemverhaltens bei mittleren Tideverhältnissen. Die zuvor beschriebenen Ergebnisse haben in diesem Zusammenhang eine hohe Aussagekraft, da ein Vergleich mit den Ergebnissen (Messungen in der Natur) im Testgebiet „Ockholm“ eine gute Übereinstimmung der grundlegenden Prozeßverläufe zeigt. Die Aussagefähigkeit dieser Simulationen kann als gut eingestuft werden, da auf der Grundlage von drei verschiedenen Meßkampagnen geeicht wurde.

Die in den dargestellten Untersuchungen vor den Lahnungsfeldern erkennbaren Sedimentationsbereiche, insbesondere im Bereich der Lahnungsköpfe, sind aus den durchgeführten Geländeaufnahmen und sedimentologischen Untersuchungen des FTZ-Westküste nicht abzuleiten. Das mittlere Systemverhalten wird in den FTZ-Untersuchungen durch Extremereignisse, mit unterschiedlichen Einflüssen auf die Sedimentation in und vor den Lahnungsfeldern, überlagert. Bei diesen Extremereignissen werden die vor den Lahnungsfeldern zuvor abgesetzten Sedimentmengen erodiert. Innerhalb der Lahnungsfelder treten derartige Erosionen infolge der seegangsdämpfenden Wirkung der Lahnungsfelder nicht auf. Es kommt infolge des höheren Schwebstoffgehaltes sogar zu verstärkten Sedimentationen (MATHEJA u. STOSCHEK, 1998). Die Extremereignisse wurden jedoch durch die Messungen des FTZ-Westküste nicht erfaßt. Ein Vergleich der Ergebnisse mit diesen über einen längeren Zeitraum durchgeführten sedimentologischen Messungen bzw. Geländeaufnahmen ist daher nicht sinnvoll, da eine Superposition des mittleren Systemverhaltens der Sedimentation, über z. B. ein Jahr, zu unzulässigen Aussagen des Gesamtsedimentationsverhaltens führen würde.

Der seegangsdämpfende Einfluß der Lahnungsbauwerke kann im numerischen Modell nachgewiesen werden. Dies wurde durch begleitende numerische Untersuchungen der physikalischen Versuche im Wellenkanal des FRANZIUS-INSTITUTS, aus denen die Eingangswerte für Rauheitskoeffizienten und Transmissionskoeffizienten abgeleitet wurden, abgesichert. Der hier angewendete „Elliptic Mild Slope“-Ansatz ist jedoch in der Praxis grundsätzlich auf seine Anwendbarkeit hin zu überprüfen, um seine Einbeziehung in das Modell hinsichtlich der modellierbaren Sohlneigung und der tidebedingten Variation des Wasserstandes sicherer zu machen.

Die angesetzten sedimentologischen Parameter wurden auf der Grundlage von Erfahrungswerten in ähnlich gelagerten Projekten und auf der Grundlage von Literaturwerten gewählt. Die aufgetretenen Abweichungen der berechneten Sedimentations- und Erosionsraten im Testgebiet „Ockholm“ von den in der Natur gemessenen können durch in der Natur vorhandene Küstenlängsströmungen und den sich infolgedessen einstellenden Küstenlängstransport begründet werden. Trotzdem ist es möglich, auf der Grundlage des aufgebauten numerischen Modells im Testgebiet „Ockholm“ den Einfluß der Lahnungsbauwerke auf den Sedimentations- bzw. Erosionsvorgang zu beurteilen. Bereiche hoher und niedriger Sedimentation/Erosion sind schlüssig und nachvollziehbar. Es kann davon ausgegangen werden, daß die zu beschreibenden Naturprozesse mit den angewandten Verfahren beschreibbar sind. Aus dieser Übereinstimmung im Testgebiet „Ockholm“ kann geschlossen werden, daß die innerhalb der Parameterstudie durchgeführten Untersuchungen zu realistischen Ergebnissen geführt haben und damit grundlegende Fragen beantwortet werden konnten. So nimmt die Gesamtmenge sedimentierten Materials mit zunehmender Öffnungsweite im Vergleich zu Varianten ohne Anwurf ab, da die Strömungsgeschwindigkeiten und damit die sedimentationsverzögernde Strömungsturbulenz im Lahnungsfeld zunehmen. Diese Abnahme der Sedimentationsmenge ist in Feldern ohne Gruppen höher als in Feldern mit Gruppen, da Gruppen im allgemeinen die Ausbildung von Walzen in den Lahnungsfelder behindern. Die seegangsdämpfende Wirkung von Lahnungsfeldern hat einen großen Einfluß auf die im Feld ablaufenden Sedimentations- und Erosionsprozesse. Ihrer Berücksichtigung sollte in der Praxis besondere Aufmerksamkeit zukommen.

Mit diesen Ergebnissen stehen erste Anhaltspunkte für die Vorauswahl von den örtlichen Verhältnissen angepaßten Ausführungsvarianten zur Verfügung. Es empfiehlt sich jedoch die Überprüfung in einem numerischen Modell. So können in relativ kurzer Zeit optimierte Ausführungsvarianten konzipiert werden, die auf die örtlichen Bathymetrieverhält-

nisse, den einlaufenden Seegang im Projektgebiet und die vorhandenen sedimentologischen Randbedingungen zugeschnitten sind.

Bei der Übertragung der dargestellten Untersuchungsergebnisse auf andere Küstenabschnitte sind in jedem Falle die örtlich stark variierenden Eingangsparameter (Bathymetrie, Tide- und Seegangsverhältnisse sowie sedimentologische Parameter) zu prüfen und anzupassen und mit den hier verwendeten Parametern zu vergleichen. Gerade im Bereich der sedimentologischen Parameter können geringfügige Abweichungen (Fraktionierung, mittlere Sinkgeschwindigkeit, kritische Sedimentations- und Erosionsgeschwindigkeit, Sedimenteintrag in Betrag und Richtung) die resultierenden Sedimentations- und Erosionsraten stark beeinflussen. Der Erhebung der Grundlagendaten kommt somit eine besondere Bedeutung zu. Da die Sedimentation bzw. Erosion in Lahnungsfeldern langfristig zu betrachten ist, ist die Berücksichtigung von Extremereignissen wichtig.

Die erzielten Ergebnisse sind teilweise mit den überlieferten Erfahrungswerten deckungsgleich (z. B. für die Wahl der Öffnungsbreite) und sichern diese zusätzlich ab. Teilweise widerlegen die Ergebnisse jedoch auch die bisher vorherrschenden Auffassungen über die sedimentologischen Auswirkungen eines Anwurfes, wenngleich die konstruktive Bedeutung außer Frage steht. Der Einfluß verschiedener Lahnungsbauweisen kann mit der vorliegenden Studie abgeschätzt werden und auch im Bereich anderer Küstenabschnitte prinzipiell angewendet werden. Sie können in diesem Zusammenhang u.a. als Grundlage für den Aufbau numerischer Modelle dienen, welche für die örtlichen Gegebenheiten Anhaltswerte für eine optimierte Anordnung und Gestaltung der Lahnungsfelder liefern können.

Mit den vorgestellten Methoden ist eine erste Beurteilung des Natursystems auf der Grundlage numerischer Modelle möglich, sofern die notwendige Datengrundlage in ausreichender zeitlicher Ausdehnung zur Verfügung steht. Die Anwendung numerischer Modelle kann hier einen ersten Eindruck über das Systemverhalten liefern und so zu einer Optimierung der Küstensicherungsarbeiten beitragen. Eine weitere Verbesserung der eingeleiteten Maßnahmen kann dann auf der Grundlage eines Systemmonitorings erreicht werden.

Gegenstand der zukünftigen Forschung muß die weitere Verfeinerung bzw. Ergänzung der numerischen Ansätze, aber auch der eingesetzten Meßverfahren zur Quantifizierung der Sedimentations- und Erosionsbereiche sein. Diese Entwicklung muß das langfristige Verhalten des Systems durch einen Abgleich mit Messungen in der Natur beschreiben können, Extremereignisse in die Betrachtung einbeziehen und eine qualifizierte Aussage über den Einfluß von Eisgang ermöglichen, was bisher noch nicht möglich ist.

6. Schriftenverzeichnis

- BATTJES, J. A. u. JANSSEN, J. P. F. M.: Energy Loss and Set-Up due to Breaking of Random Waves. Proc. 16th Int. Conf. on Coastal Eng., Hamburg, S. 569-587, 1978.
- COPELAND, G. J. M.: Practical Radiation Stress Calculations Connected with Equations of Wave Propagation. Coastal Engineering, H. 9, S. 195-219, 1985.
- DANISH HYDRAULIC INSTITUTE (Hrsg./DHI): MIKE21: Coastal Hydraulics and Oceanography; Hydrodynamic Module. Release 2.6, User Guide and Reference Manual. Horsholm, Dänemark, 1997a.
- DANISH HYDRAULIC INSTITUTE (Hrsg./DHI): MIKE21: Elliptic Mild-Slope Wave Module. Release 2.6, User Guide and Reference Manual. Horsholm, Dänemark, 1997b.
- DANISH HYDRAULIC INSTITUTE (Hrsg./DHI): MIKE21: Sediment Processes; Mud Transport Module: Multi-Fraction, Mud Transport Module: Multi-Layer. Release 2.6, User Guide and Reference Manual. Horsholm, Dänemark, 1997c.

- ELDER, J. W.: The Dispersion of a Marked Fluid in a Turbulent Shear Flow. *J. Fluid Mech.*, H. 5, S. 544–560, 1959.
- LIEBERMAN, N. VON: Ausführung und Wirkungsweise von Lahnungen, *Die Küste*, H. 60, S. 191, 1998.
- MADSEN, P. A.: Wave Reflection from a Vertical Permeable Wave Absorber. *Coastal Engineering*, H. 7, S. 381–396, 1983.
- MADSEN, P. A. u. LARSEN, J.: An Efficient Finite-Difference Approach to the Mild-Slope Equation. *Coastal Engineering*, H. 11, S. 329–351, 1987.
- MATHEJA, A. u. O. STOSCHEK: Influence of extreme events on sedimentation in sedimentation fields enclosed by brushwood fences. In: BABOVIC, V. & L. C. LARSEN (Eds.): *Proceedings of the 3rd International Conference on Hydroinformatics*, Kopenhagen, Vol. 2, S. 1411–1418, 1998.
- RIJN, L. C. VAN: *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*. Aqua Publications, Amsterdam, 1993.
- SMAGORINSKY, J.: General Circulation Experiments with Primitive Equations. *Monthly Weather Review*, H. 91, S. 91–164, 1963.
- SWART, D. H.: *Offshore Sediment Transport and Equilibrium Beach Profiles*. Delft Hydr. Lab., Publ. 131, Delft, 1974.
- WARREN, I. R. et al.: Application of Short Wave Numerical Models to Harbour Design and Future Development of the Model. *Int. Conf. on Numerical and Hydraulic Modelling of Ports and Harbours*, Birmingham, 1985.